

**ERNEST ORLANDO LAWRENCE
BERKELEY NATIONAL LABORATORY**

美国劳伦斯伯克利国家实验室

关于水泥行业预处理和协同处置城市 固体废弃物及污泥的国际最佳实践

**Ali Hasanbeigi, Hongyou Lu, Christopher Williams,
Lynn Price**

劳伦斯伯克利国家实验室
环境能源技术部
能源分析与环境影响处
中国能源研究室

2012 年 7 月

本项工作通过美国能源部，获得能源基金会与美国环境保护局以
及工业生产力研究所的资助，合同编号为 DE-AC02-05CH11231。

免责声明

本文得以编撰，皆得益于美国政府资助的一项研究。本文所载资料确为真实无误，然则就本文所披露的信息、装置、产品或工艺的准确性、完整性及有效性而言，美国政府连同其下辖机关、加利福尼亚大学校董及其员工，并未进行明示或暗示地保证、表述或暗指，不对其承担责任，遑论担保其之使用不会侵犯他人私有权利。文中述及各商标、品牌或制造商的商品、工艺或服务，不必然构成或暗示美国政府连同其下辖机关以及加利福尼亚大学校董支持、推荐或偏爱之。本文作者于文内之观点或看法，不必然代表或反映美国政府连同其下辖机关以及加利福尼亚大学校董的观点或看法。

劳伦斯伯克利国家实验室奉行有雇无类的准则。

关于水泥行业预处理和协同处置城市固体废弃物及污泥的国际最佳实践

Ali Hasanbeigi, Hongyou Lu, Christopher Williams, Lynn Price

劳伦斯伯克利国家实验室
环境能源技术部
能源分析与环境影响处
中国能源研究室

摘要

水泥窑协同处置城市固体废弃物(MSW)和污泥，不但能够减少水泥行业日益增长的化石燃料用量以及二氧化碳(CO₂)排放，而且有助于解决与日俱增的安全环保的城市垃圾处理方式需求。

目前，全球 5%左右的人为二氧化碳排放量源自于水泥行业。鉴于水泥行业不断增加的需求和产量，其绝对能源用量和二氧化碳排放量将随之增长。传统的水泥窑依赖于不可再生且迅速枯竭的化石燃料。水泥窑处置废弃物，亦即协同处置，能够缓解水泥行业对于化石燃料的依赖，同时降低相关的二氧化碳排放量。协同处置废弃物所剩余的残渣经烧结后，可节省原材料。此外，水泥生产过程中协同处置废弃物能够减缓世界各地，尤其是经历快速城市化的发展中国家，所面临的与废物生成量上升有关的各类问题。许多城市和位于城区的政府，特别是废物管理体系落后的城区政府，对于以有利于保护人类和环境健康的方式处置城市固体废弃物及污泥一事，愈发地力不从心。

水泥窑的高温和足够长的停留时间，连同水泥生产过程的其他特点，使得协同处置废物成为了行之有效的方法。水泥窑协同处置废物已有超过 20 年的历史，这种方式目前在美国、日本、欧盟诸国等发达国家极为盛行。中国、东南亚列国等发展中国家，目前都已制定计划促进水泥行业协同处置废物的发展。相较于那些拥有漫长的水泥行业协同处置废物历史的国家，发展中国家的法规、标准和技术架构都不甚完善。

本报告的目的在于介绍水泥行业预处理和协同处置城市固体废弃物及污泥的国际最佳实践，以利于有关各国发展自身的协同处置能力。本报告分为三大章节。第二节介绍协同处置的基础原则，第三节介绍典型的国际协同处置监管和制度框架，而第四节则介绍协同处置技术层面的国际最佳实践。

目录

摘要	i
1. 引言	1
1.1 城市固体废弃物	1
1.2 污泥	2
1.3 协同处置：解决方案的一部分	3
2 水泥行业协同处置城市固体废弃物及污泥的基本情况.....	4
2.1 水泥生产	4
2.1.1 水泥生产过程 CO ₂ 排放的影响	4
2.2 水泥行业协同处置城市固体废弃物与污泥	4
2.3 协同处置城市固体废弃物和污泥的原因与目的	7
2.4 协同处置对于水泥与混凝土质量的影响	11
2.5 能源消费与废物协同处置之间的权衡	12
2.6 废弃物协同处置的经济性	13
2.7 协同处置的健康与环境风险	14
2.8 协同处置的主要障碍	14
3 废物协同处置的法律、监管及制度框架：国际最佳实践	16
3.1 一般法律框架	16
3.1.1 欧盟	16
3.1.2 美国	19
3.1.3 日本	20
3.2 法规与标准	20
3.2.1 环境绩效要求	21
3.2.2 产品质量要求	27
3.2.3 废物质量要求	28
3.2.4 操作要求	29
3.2.5 安全与健康要求	30
3.3 制度框架	30
3.3.1 废物收集与管理	31
3.4 许可与性能审批	34
3.5 监测制度要求	38
3.6 法规执行	40
4 协同处置的技术层面——国际最佳实践.....	42
4.1 预处理技术与实践	42
4.1.1 城市固体废弃物的预处理技术与实践	42

4.1.2 污泥预处理技术与实践	50
4.2 贮存、处理与喂料系统	57
4.2.1 贮存	58
4.2.2 装卸与输送机	58
4.2.3 喂料与配料系统	58
4.3 水泥窑协同处置城市固体废弃物与污泥	60
4.3.1 替代能源喂料点的选择	61
4.3.2 多燃料燃烧器	62
4.3.3 协同处置所需的额外窑炉系统改善/改造	63
4.4 产品质量控制系统	67
4.5 排放与大气污染物	67
4.5.1 协同处置对水泥窑排放的影响	67
4.5.2 排放控制技术	71
4.5.3 持续烟气排放监测系统	72
4.6 健康与安全实践	73
5 总结	75
致谢	75
参考资料	76
附录	94
附录一 水泥生产流程与能源使用	94
附录二 不同窑炉技术的反应带图解	96
附录三 接受—拒绝示例图	97
附录四 RDF 生产线的性能与成本	98
附录五 澳大利亚预处理与协同处置污泥的流程图	100
附录六 水泥制造过程气体污染物的控制技术	101
附录七 使用 CEMS 测定水泥厂各类污染法的方法推荐	104
附录八 水泥厂排放测量标准：取样与分析	105
附录九 水泥行业替代燃料预处理与协同处置技术供应商名单	106

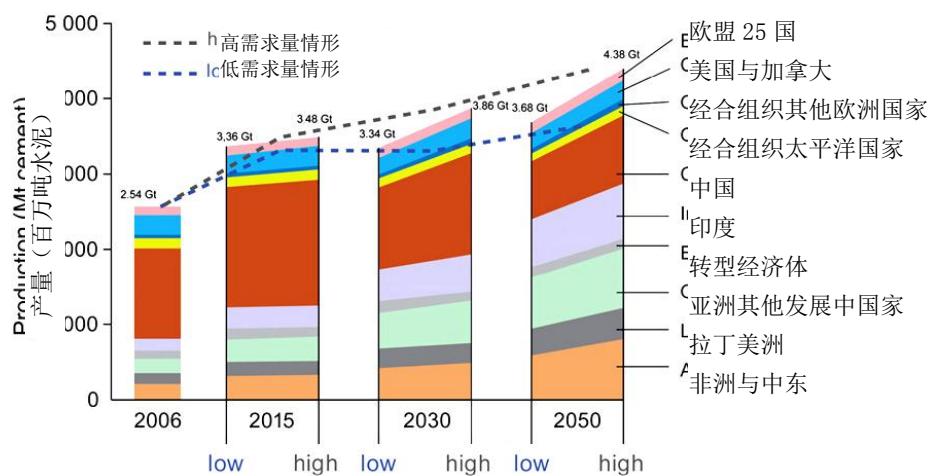
首字母缩略词

BAT	最佳可用技术 (best available technique)
CaCO ₃	石灰石 (limestone)
CaO	石灰 (lime)
CO	一氧化碳 (carbon monoxide)
CO ₂	二氧化碳 (carbon dioxide)
CEMBUREAU	欧洲水泥协会 (European Cement Association)
CEMS	烟气排放连续监测制度 (continuous emissions monitoring systems)
CISWI	工商业固体废弃物焚化 (commercial and industrial solid waste incineration)
EIPPCB	欧盟综合污染防 控局 (European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau)
EPAV	维多利亚州环保局 (Environmental Protection Authority of Victoria)
E-PRTR	欧盟污染物排放及迁移登录系统 (European Pollutant Release and Transfer Register)
ERT	电子报告工具 (electronic reporting tool)
EU	欧盟 (European Union)
GJ	十亿焦耳 (gigajoule)
HAP	有害空气污染物 (hazardous air pollutant)
HF	氟化氢 (hydrogen fluoride)
IPPC	综合污染防控 (Integrated Pollution Prevention and Control)
ISO	国际标准化组织 (International Standards Organization)
kWh	千瓦时(kilowatt-hour)
MACT	最大可行控制技术 (maximum achievable control technology)
MBT	机械生物处理 (mechanical biological treatment)
μm	微米(micrometer)
MSW	城市固体废弃物 (municipal solid waste)
Mt	百万吨 (million tonnes)
NCV	低位发热量 (net calorific value)
ng	毫微克 (nanogram)
Nm	纳米 (nanometer)
NOx	氮氧化物 (nitrogen oxide)
O ₂	氧气 (oxygen)
NSP	新型悬浮预热器/预分解炉 (new suspension preheater/precalciner)
PAH	多环芳香烃 (polycyclic aromatic hydrocarbon)
PCDD	多氯二苯并二恶英 (polychlorinated dibenzo-p-dioxin)
PCDF	多氯二苯并呋喃 (polychlorinated dibenzofuran)
POP	持久性有机污染物 (persistent organic pollutant)
ppm	百万分率 (parts per million)
RDF	废弃物衍生燃料 (refuse-derived fuel)
SO ₂	二氧化硫 (sulfur dioxide)
t	吨 (tonne)

TEQ	毒性当量 (toxic equivalency basis)
U.S. EPA	美国环保局 (United States Environmental Protection Agency)
VOC	挥发性有机化合物 (volatile organic compound)
WBCSD	世界企业永续发展委员会 (World Business Council for Sustainable Development)
WFD	废弃物框架指令 (Waste Framework Directive)
WID	废弃物焚化指令 (Waste Incineration Directive)
WWTP	废水处理厂 (wastewater treatment plant)

1. 引言

水泥行业严重依赖于化石燃料，并且占据了全球人为二氧化碳排放总量的5%(WBCSD/IEA 2009a)。水泥的需求和产量不断增加。预计到2050年，全球年度水泥产量将从2006年约2,540 Mt (百万吨) 增长为3,680 Mt(最低估值)或4,380 Mt(最高估值)。中国、印度和亚洲大陆其他发展中国家将贡献水泥产量增长的绝大部分(图1) (WBCSD/IEA 2009b)。水泥产量的显著增长，伴随着水泥行业绝对能源用量及二氧化碳排放量的大幅上升。替代燃料的使用有助于降低化石燃料资源快速枯竭的速度。此外，倘若替代燃料拥有更低二氧化碳排放系数或含有生物量，亦有助于降低水泥行业的二氧化碳排放量。



注：OECD 指经济合作与发展组织

图 1：全球年度水泥产量(WBCSD 2009b)

除了水泥行业目前所面临的能源用量和 CO₂ 排放量挑战之外，寰球各国也需要应对日益增长的废物生成量问题。这一问题在经历快速城市化的发展中国家尤为显著。至于如何安全而又环保地处置不断增长的城市固体废弃物(MSW)和污泥，许多国家的城市和政府深感力不从心。最后，协同处置废弃物所剩余的残渣经烧结后，可节省原材料。

1.1. 城市固体废弃物

城市固体废弃物涵括了人们在日常生活中使用后而丢弃的各种物品，诸如产品外包装、家具、衣物、瓶子、残羹剩饭、报纸、家电、颜料及电池(U.S. EPA 2012a)。固体废弃物的构成，取决于源头、季节、以及当地居民的生活方式和行为。未经处理的城市固体废弃物水分含量高、发热量低、粒度范围广、且灰分含量高。由此，将未经处理的城市固体废弃物作为燃料，既困难也不具备吸引力。城市固体废弃物可由机械处理厂 (MT 厂) 或机械生物处理厂 (MBT 厂) 进行处理。经这两种方式处理后所得的废弃物衍生燃料 (RDF)，具有比未经处理的废弃物明显更高的热值。除了拥有更高的发热量之外，RDF 的物理化学成分比未经处理的废弃物来得均匀；更容易贮存、装卸和运输；排放更少的污染物；并且在燃烧过程中无需过多的空气(Nithikul 2007)。

表 1 展示了世界部分国家所产生的城市固体废弃物数量。近年来，部分发达国家的废弃物生成总量及人均量均已稳定或不断下降（例如美国[U.S. EPA 2012a]）。然而，部分发展中国家的数据却呈现增长态势（例如中国[NBS 2005-2011]）。此外，发达国家的废弃物循环率总是高于发展中国家 (Zhang 等人. 2010)。图 2 以 2006 年的中国城市固体废弃物的处置方式为例。

表 1. 2005 年世界部分国家所产生的城市固体废弃物数量 (Zhang 等人. 2010)

国家	城市固体废弃物生成总量	城市固体废弃物生成率
	(千吨)	(千克/人/天)
美国	222,863	2.05
法国	33,963	1.48
德国	49,563	1.64
丹麦	3,900	2.03
瑞士	4,855	1.78
波兰	9,354	0.68
葡萄牙	5,009	1.29
匈牙利	4,632	1.26
墨西哥	36,088	0.93
日本	51,607	1.10
韩国	18,252	1.04
中国 (2006)	212,100	0.98

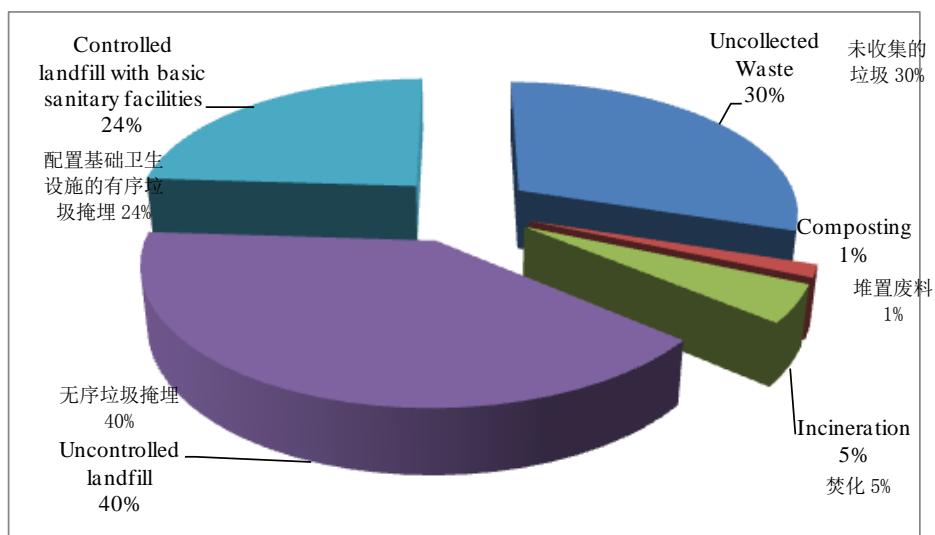


图 2. 2006 年中国城市固体废弃物的处置方式 (Zhang 等人. 2010)

1.2. 污泥

污泥主要来源于城市废水处理厂 (WWTPs)。由于近年来城市社区在数量和规模上的不断扩张，以及工业生产排放废水总量的日益增长，污泥的生成量大幅提高(HE ET AL. 2007; MILIEU LTD, WRC 与 RPA 2008)。

2007 年，美国为数 16,583 的废水处理厂产生了大约 6.5 Mt 的干污泥（生物固体）（U.S. EPA 2008）。在美国和其他国家产生的大部分污泥，最终都复归于大地或送往垃圾掩埋场，而非在水泥窑中予以焚化后再行回收能源（MILIEU LTD, WRc 与 RPA 2008）。

复归于大地的污泥，必须严格遵守人类与环境健康标准。受到工业废水重金属感染的污泥，则不适于农业使用（MURRAY 与 PRICE 2008）。

鉴于中印等发展中国家正迅速地扩充其废水处理装置的数量，因此这类国家的污泥生成量亦不断增长。纵观 2005 年，中国废水处理厂产生了 9 Mt 的脱水污泥。这一数值预计在十年内达到 27 Mt（MURRAY 与 PRICE 2008）

1.3. 协同处置：解决方案的一部分

对于发展中国家和转型期国家而言，废弃物管理方式的落后或欠缺仍是一个问题。在其中许多国家，废弃物被任意地排入下水道、掩埋或焚烧，或被非法弃置于不宜场所，或被送往不具备废弃物环保处理资质的垃圾掩埋场填埋。这类做法可能污染土壤、水源和大气，导致邻近区域居民的生存环境和健康状况持续恶化。

水泥窑协同处置部分废物是该问题解决方案的一部分(GTZ/Holcim 2006)。现在通常被填埋或用于农业的污泥，也能够作为水泥熟料生产过程的替代燃料和原材料。目前已有许多欧洲国家采用这种污泥管理方式(CEMBUREAU 2009)。经过预处理的城市固体废弃物和污泥，每干吨具有相对较高的高位发热量(NCV)(以十亿焦耳计)。经过预处理的城市固体废弃物和污泥，相较于同样经水泥窑处理的煤炭而言，具有更低的二氧化碳排放系数。表 2 展示了作为替代能源的城市固体废弃物和污泥所具有的特征。然而在部分发展中国家，城市污染废弃物的能量甚至低于表 2 所展示的范围。

表 2. 作为替代能源的城市固体废弃物与污泥的典型特征(Murray 与 Price 2008)

燃料	替代率 (%燃料)	能量 (NCV) (GJ/干吨)	水分(%)	CO ₂ 排放系数 (CO ₂ /t)
城市固体废弃物（废弃物衍生燃料部分）	最高30	12 – 16	10 – 35	0.95 - 1.32
脱水污泥	20	9 – 25	75	0.29
干污泥	20	9 – 25	20	0.88

2. 水泥行业协同处置城市固体废弃物及污泥的基本情况

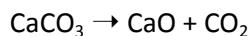
如下各小节介绍了水泥生产流程、二氧化碳排放的影响、以及水泥行业协同处置城市固体废弃物与污泥所面临的各类问题。

2.1. 水泥生产

现如今的水泥生产流程，始于原料（通常为石灰石 CaCO_3 、粘土和白垩）的开采、破碎和粉磨，而后原料以干粉或泥浆的形式混合送入水泥窑。原料在水泥窑内的温度可高达 $1,450^\circ\text{C}$ 。水泥窑内的热量将原料熔融成小球状物体，亦即我们所说的熟料。冷却后的熟料与石膏混合，继而粉磨成细粉状硅酸盐水泥。美国材料试验协会界定了若干具有不同属性的硅酸盐水泥类别，以及若干种由硅酸盐水泥混合飞灰、天然火山灰（一种硅酸质火山灰）、人工火山灰以及高炉渣之后形成的混合水凝水泥(PCA 2012)。对于包含了替代原料的水泥，欧盟亦有类似的分类。附录 1 更为详致地介绍了水泥的生产流程，重点关注于水泥生产过程中的能源用量。

2.1.1. 水泥生产过程 CO_2 排放的影响

每生产一公吨的水泥约释放 0.73 至 0.99 吨的二氧化碳，具体视熟料比例与其他系数而定。区分水泥行业与其他大部分行业的重要标准在于燃料消耗是否为 CO_2 排放的首要因素。水泥生产过程中超过 50% 的二氧化碳排放，或每吨熟料约 540 千克的二氧化碳排放量，来自于水泥煅烧工序。在此期间，碳酸钙发生如下化学反应，转化成了石灰(CaO)。



剩余在水泥生产过程中所排放的二氧化碳，系源于燃料燃烧以提供煅烧工序所需的热能。用于煅烧熟料的水泥窑，温度可高达 $1,450^\circ\text{C}$ 左右。每生产一吨水泥，平均需消耗 100 到 110 千瓦时(kWh)的电力(WWF 2008)。因使用电力而排放的二氧化碳，平均占水泥行业二氧化碳总排放量的百分之五。这一数据可随着当地电力生产所采用的能源类型以及能源使用效率，而产生不足百分之一至高于百分之十的变动。大约有百分之五的二氧化碳排放量产生于矿石开采和运输环节(WWF 2008)。

2.2. 水泥行业协同处置城市固体废弃物与污泥

巴塞尔公约(2011)将协同处置定义为“为达成能源和/或资源回收目的而在生产过程中使用废弃原材料，从而导致了常规燃料用量和/或原材料用量的下降（使用了替代燃料或原材料）”。这同样是工业生态学的一个思想，关乎于某行业在减轻产品生命周期的环境负载方面所能发挥的潜在作用。『巴塞尔公约』进一步将协同处置定义为“可能导致资源回收、资源再生、资源直接再利用或资源多用途性”的一个操作过程。（『巴塞尔公约 2011』）

废弃物协同处置已经拥有 20 多年的历史，尤其是在欧洲、日本、美国、加拿大等发达国家或地区(GTZ/Holcim 2006; Genon 与 Brizio 2008)。图 3 显示了 2003 年和 2004 年欧洲水泥行业协同处置的废弃物数量。纵观 2006 年，废弃轮胎和废弃溶剂之外的替代燃料（如城市固体废弃物

和污泥），整体占据了美国水泥行业能源总使用量约百分之二点五(EPA, 2008)。截至 2009 年，占全美总数百分之七十的 63 家水泥厂，都是用了替代燃料(PCA, 2012)。

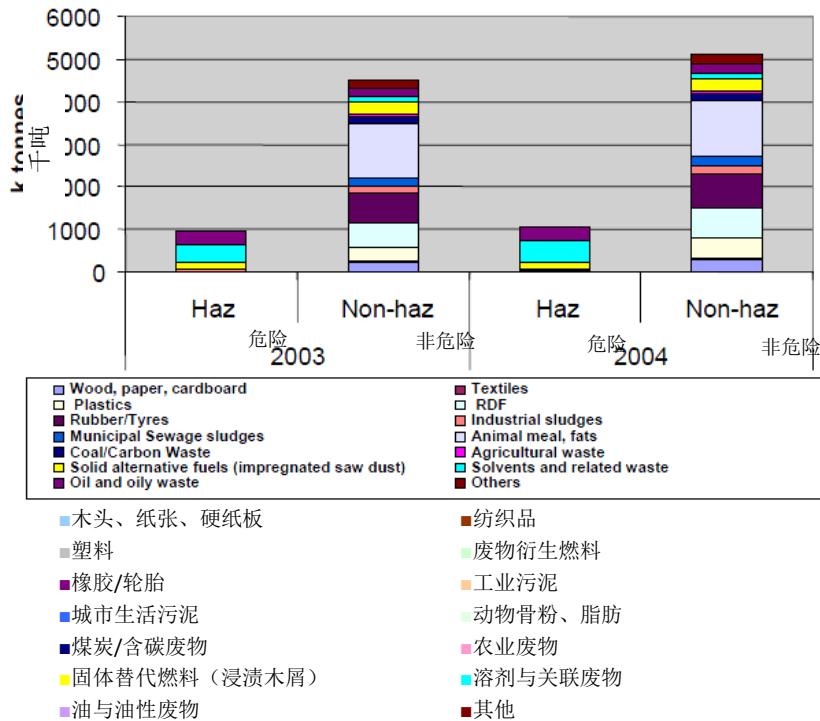


图 3. 2003 年及 2004 年欧盟水泥行业协同处置的危险与非危险废弃物数量(EIPPCB 2010)

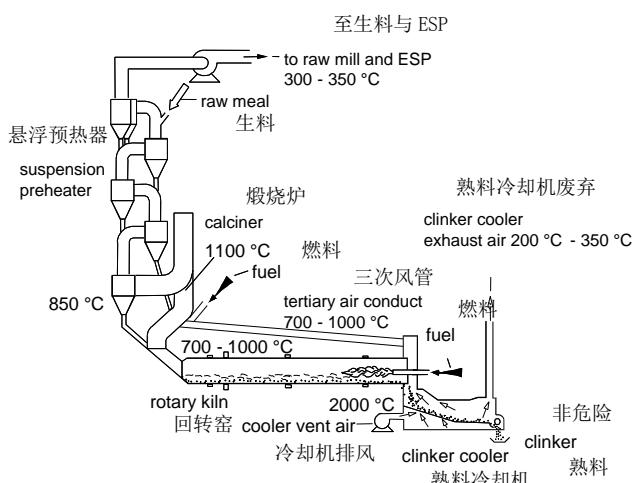
欧盟综合污染防控局 (EIPPCB) (2010)界定了水泥生产过程之所以适于废弃物协同处置的若干特点：

- 回转窑最高温度约为2,000°C (主燃系统、火焰温度)
- 回转窑温度高于1,200°C时，气体停留时间约为8秒
- 回转窑烧结带的原料温度约为1,200°C
- 回转窑内气体具有氧化性
- 温度高于1,200°C时，二燃室气体停留时间超过2秒；同理，预分解窑温度愈高，气体停留时间愈长
- 二燃室和/或分解炉的固体温度可达850°C
- 由于高温和足够长的停留时间，因此能够维持均匀的燃尽状态，避免负荷波动
- 由于高温和足够长的停留时间，因此能够摧毁有机污染物
- 碱性反应物能够吸附氟化氢(HF)、氯化氢(HCl)、二氧化硫(SO₂)等气体成分
- 颗粒物吸附态重金属具有较高的吸附能力
- 已知温度范围内短暂的废弃停留时间，促使重新合成二恶英与呋喃
- 充分使用废渣作为熟料成分
- 由于原材料完全融入熟料，因此不会产生特定产品的废弃物（欧洲部分水泥厂对旁路窑灰进行了处理）
- 非挥发性重金属以化学—矿物学的方式融入熟料中

表 3 展示了水泥生产过程中的温度与停留时间。图 4 展示了带悬浮预热和预分解窑的回转窑内不同位置的温度。

表 3. 水泥生产过程中的温度与停留时间(GTZ/Holcim 2006)

特征	数值
主燃室温度	> 1450 °C: 物料 >1800 °C: 火焰温度
主燃室停留时间	>12-15 秒 > 1200 °C > 5-6 秒 > 1800 °C
预分解器温度	> 850 °C: 物料 >1000 °C: 火焰温度
预分解器停留时间	> 2-6 秒 > 800 °C
预分解器停留时间	> 2-6 秒 > 800 °C



* ESP: 静电沉淀器。新近水泥厂使用袋式集尘器

图 4. 带悬浮预热和预分解窑的回转窑内不同位置的温度(Schneider 等人. 1996)

并非所有的废弃物都适合于水泥行业的协同处置。在选择待协同处置的废弃物时，需考虑若干因素，包括废弃物与产成品（水泥）的化学成分、以及协同处置造成的环境影响。不适于协同处置的典型废弃物为核工业废料、传染性医疗废物、电池、以及未经分类的城市垃圾。GTZ/Holcim (2006)列出了适于协同处置的废物清单。附录 3 是同意或拒绝协同处置某类废弃物的决策图示例(CEMBUREAU 2009)。

GTZ/Holcim (2006)提出了水泥行业协同处置废弃物时需要遵循的五大基本原则，如表 4 所示。

表 4. 水泥行业协同处置废弃物的基本原则(GTZ/Holcim 2006)

原则 1	协同处置必须遵守废物管理体系（参见图 5）： <ul style="list-style-type: none"> 协同处置不得有碍于减少废物的努力，并且在拥有更符合生态和经济效益的回收方式时，废弃物不得通过水泥窑进行处置。 协同处置应当被视为当代废物管理不可分割的一部分，因为它为废物管理提供了一条环保可行的资源回收途径。 协同处置必须遵守相关的国际环境协议，例如『巴塞尔公约』和『斯德哥尔摩公约』。
原则 2	应当避免额外排放以及对人体健康造成负面影响： <ul style="list-style-type: none"> 为避免或维持最低水平的污染对人体与环境健康所造成的负面影响，排向大气的污染物不得高于使用传统燃料生产水泥所排放的污染物数值。
原则 3	水泥产品的质量需保持不变： <ul style="list-style-type: none"> 产品（熟料、水泥、混凝土）不得被滥用作重金属的沟槽。 产品不得对环境造成任何的负面影响，这点需通过淋溶试验予以验证。 水泥的品质需符合可回收标准。
原则 4	从事协同处置的公司必须具备相应的资质： <ul style="list-style-type: none"> 这类公司必须拥有良好的环境与安全合规记录，并且向公众和主管机关提供相应的信息。 这类公司必须具备人手、工艺和系统致力于环境保护、健康与安全。 这类公司必须遵守全部的适用法律、法规和规则。 这类公司具备控制进料和工艺参数的能力，以此更为有效的进行废物协同处置。 这类公司必须与公众以及地方级、国家级和国际级废物管理体系的其他行为体保持良好的关系。
原则 5	协同处置的实施需要考虑国情： <ul style="list-style-type: none"> 条例和规程必须反映国家的要求和需求。 逐步实施以确保产能建设与体制安排。 引入协同处置的同时，必须改善某国在废物管理领域的其他状况。

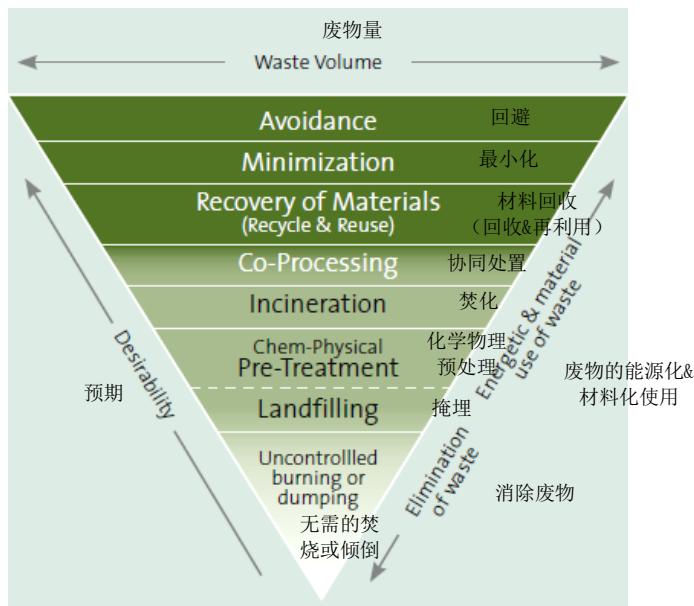


图 5. 废物管理体系 (GTZ/Holcim 2006)

2.3. 协同处置城市固体废弃物和污泥的原因与目的

世界各地的水泥制造商都使用城市固体废弃物、污泥及其他替代燃料作为化石燃料的替代品。工业化国家已经拥有20多年的水泥行业协同处置废弃物的成功经验(GTZ/Holcim 2006)。荷兰和

瑞士是这一领域的领头羊，这两个国家的水泥厂所使用燃料当中，分别有83%和48%来源于废弃物(WBCSD 2005)。美国环保局(U.S. EPA)在一份研究报告中指出，许多美国水泥厂认为替代原料的使用对于持续保持竞争力具有重大意义。如下文所述，除了废物管理之外，水泥窑协同处置城市固体废弃物和污泥还有诸多益处。

节约燃料成本，尤其是现如今面临着燃料价格不断上涨趋势：

鉴于目前成本不断上升的势头，水泥厂经营方关心未来燃料价格也就不足为奇。能源通常占据水泥制造业经营成本的30%到40%；倘若成功地节省能源支出，势必使水泥厂更具备竞争力，同时能够维持或增加其利润空间。处置成本随着废物类别与地方行情而变动，但水泥厂通常收费处理废弃物；在其他情况下，水泥厂可免费获得废物，或者以低于同等当量煤炭或其他化石燃料的价格收购废弃物(Murray 与 Price 2008)。

在送入水泥窑之前，城市固体废弃物与污泥必须经过预处理。这一过程还需要额外的环保设备以控制污染物排放。为确保符合安全、质量和环境标准，还需要采取特殊的控制手段与工艺措施(WBCSD 2002)。废物燃料的低廉成本可以全部或部分抵消新式预处理设备或其他设备的安装费用，具体视各水泥厂情况而定。废物协同处置的经济性以及预处理和协同处置的技术因素，将分别在本报告的第2.6节和第4节进行探讨。

节省不可再生的化石燃料以及保护环境

水泥行业协同处置城市固体废弃物和污泥，能够替代相当数量的化石燃料以及节约不可再生的化石燃料资源(Karstensen 2007a)。煤炭等化石燃料的开采，通常给绿水青山带来巨大的负面影响。鉴于水泥窑协同处置废弃物能够减少对煤炭的需求，煤炭开采所造成的景观破坏也能得到显著地缓解。

减少温室气体排放：

如上文所述，水泥行业所制造的二氧化碳占据了全球人为二氧化碳排放总量的百分之五，而能源消费碳排放就占据这一数据的半壁江山：其中40%源自于燃料燃烧，剩余的10%则是电力使用与交通运输的结果(WBCSD 2005)。图6展示了CO₂排放量的历史数据以及2050年之前的预估值。就本图和图1而言，不难发现全球水泥行业CO₂绝对排放量将显著增长。

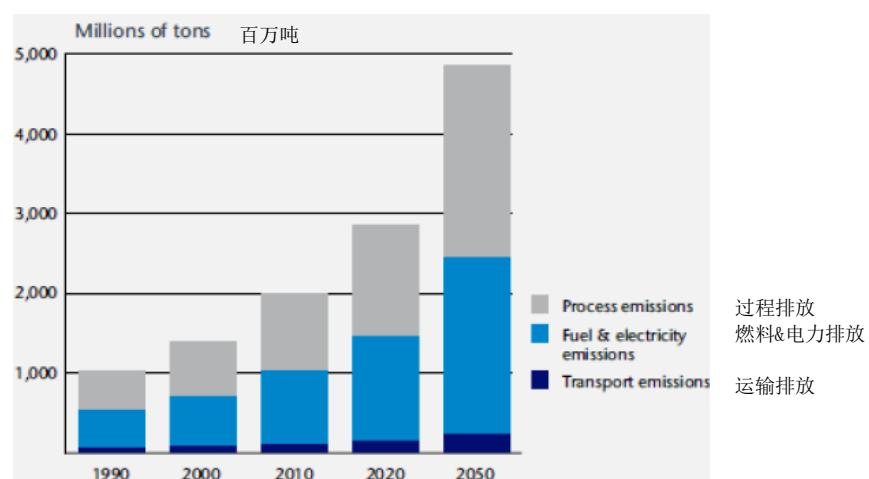


图 6. 全球水泥行业 CO₂ 排放量历史数据和预估值(Campisano 2011)

上文表2已指出，城市固体废弃物与污泥的碳排放系数显著低于煤炭。因此，以城市固体废弃物和污泥取代现如今水泥行业最为通用的煤炭，能够大幅降低二氧化碳排放量。与煤炭燃烧相比较，每协同处置1公斤的废弃物衍生燃料，能够减少1.6公斤的CO₂排放量(Genon 与 Brizio 2008)。2006年，欧洲水泥行业废物协同处置节省了百分之十八的常规燃料（通常为煤炭），这相当于每年减少8 Mt的二氧化碳排放量，以及每年节省5 Mt的煤炭(CEMBUREAU 2009)。

避免废物焚化与掩埋的负面影响

在发达国家，城市固体废弃物通常采用焚化的形式（或有或无热量回收）以减少对垃圾掩埋占地的需求。美国拥有86处城市固体废弃物焚化设施，每年能够处理2800万吨的废弃物，并产生2720兆瓦的电力。城市固体废弃物焚化之后所剩余的灰渣，约为废弃物原始体积的10%(U.S. EPA 2012b)。一般情况下，这类灰渣含有重金属，因此经常被归为危险废物分类。

各类研究都已表明了水泥行业协同处置废弃物相较于废物焚化而言具有诸多优势。荷兰应用科学组织采用生命周期评估法进行的一次研究，对比了水泥行业使用废弃物作为替代燃料/原材料所造成的环境影响，以及危险废弃物焚化炉焚烧废物而后回收电力与蒸汽所造成的影响。该研究结论指出，相较于焚化炉处理废弃物而言，水泥行业使用废弃物作为替代燃料更有利环保(CEMBUREAU 2009)。

另一项由CEMBUREAU进行的生命周期评估分析指出，相较于焚化和回收利用而言，部分城市固体废弃物（例如废弃溶剂、滤饼、颜料残余和污泥）更适合于水泥窑协同处置。该研究亦指出，协同处置废弃溶剂、滤饼、颜料残余和污泥，相较于将其置于垃圾焚化炉中焚烧而言，具有更多的环境益处。此外，该研究也表明了相较于常规焚烧或转化为再生产品而言，协同处置废弃塑料和废油能够最大程度地挖掘这两类废弃物的优势(CEMBUREAU 1999)。

图7以图表的形式展示了水泥窑协同处置废弃物是如何优越于废物焚化或掩埋。除了能够减少二氧化碳排放量之外，协同处置废弃物也能降低垃圾掩埋场的甲烷挥发。垃圾掩埋场所挥发的气体中，有百分之六十是甲烷，这种气体的增温效应是二氧化碳的21倍(CEMBUREAU 2009)。

采用填埋法处理的干/脱水污泥包含了巨量能够产生甲烷的碳元素(UNFCCC 2010)。水泥窑协同处置干/脱水污泥能够减少被掩埋污泥的甲烷排放量。图8即是协同处置对比填埋污泥的二氧化碳平衡。

此外，正如Taruya等人(2002)所指出，采用水泥窑协同处置污泥相较于使用处理厂焚化污泥而言，能够减少百分之三十的CO₂生成量，同时经协同处置的灰渣可用作水泥生产的原材料。

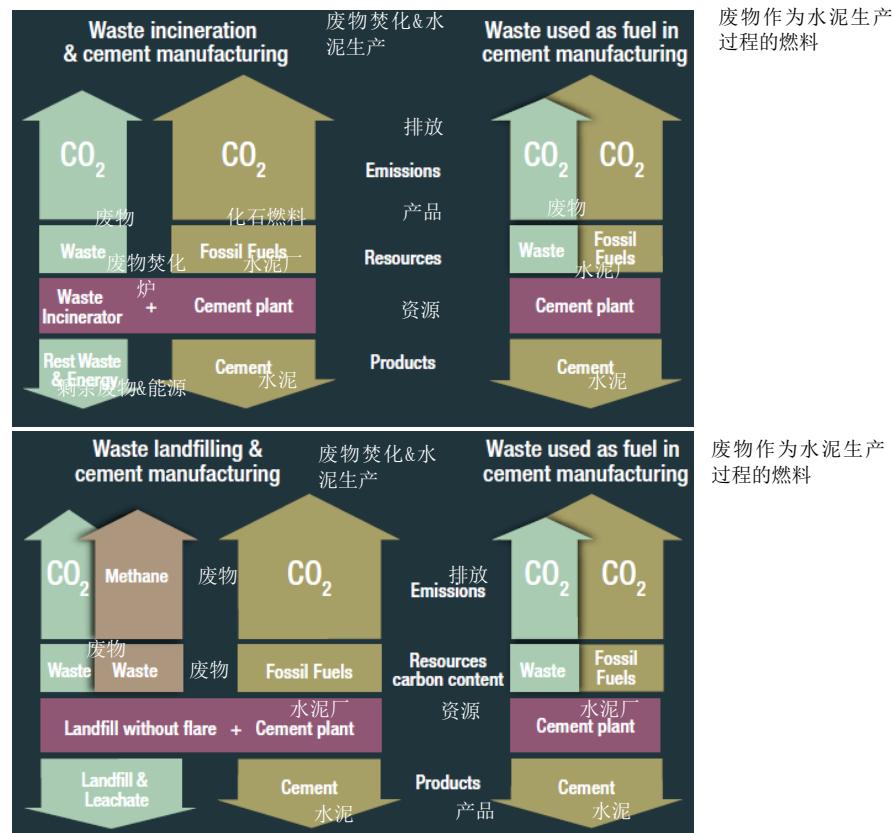


图 7. 回填法、焚化法与协同处置法的温室气体排放(CEMBUREAU 2009)

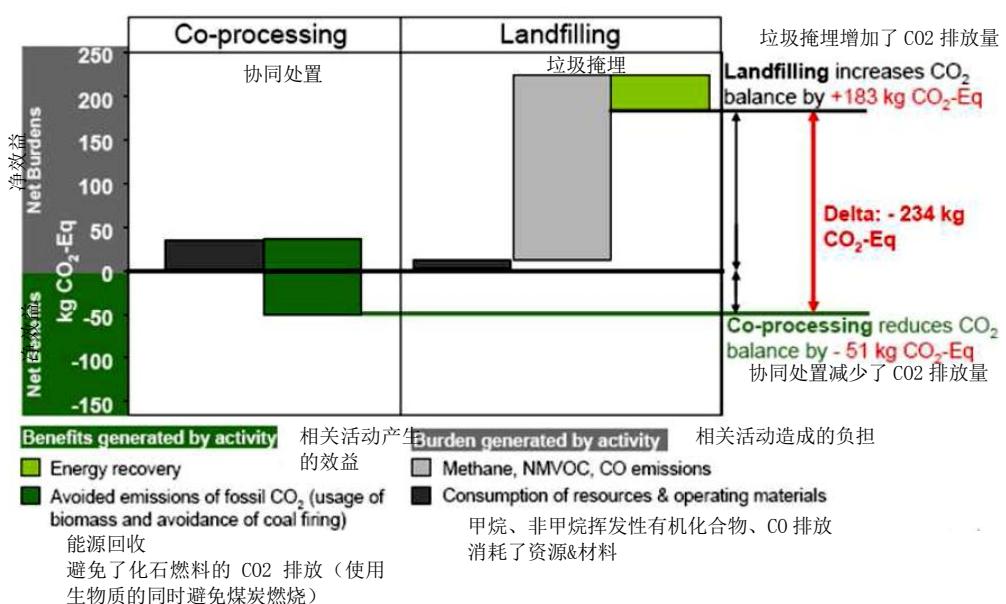


图 8. 对比协同处置与掩埋 100Kg 污泥的二氧化碳平衡(HeidelbergCement 2011)

熟料内掺入废渣，节省原材料

城市固体废弃物与污泥经协同处置而得的废渣所具备的化学成分，允许其作为常规原材料的替代品参与熟料的烧制。图9展示了污泥废渣与水泥原料具备类似的化学成分。

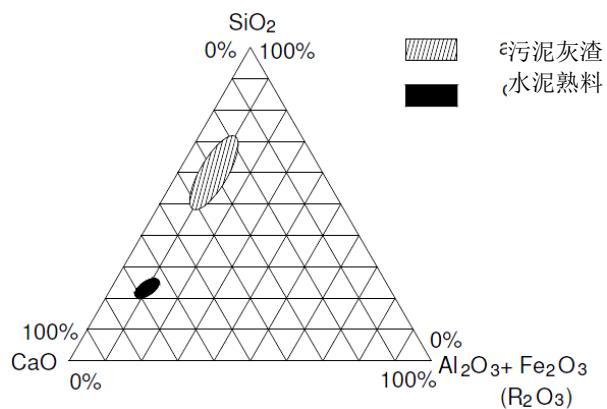


图 9. 污泥废渣与水泥熟料化学成分三元图：石灰(CaO)—二氧化硅(SiO₂)—耐高温氧化物(R₂O₃)
(Stasta 等人 2006)

此外，处理过程无需巨额热量的废料，能够作为除石灰石之外，熟料烧制所需的部分石灰，因此进一步减少生产过程的二氧化碳排放量、保护自然资源(Van Oss 2005)。

避免进行新的焚化炉或填埋设施投资

协同处置的另一优势是，市政当局可以将无法回收利用的废弃物送往水泥厂处理，而无需建设焚化炉或填埋设施以容纳此类废弃物(Murray 与 Price 2008)。协同处置还能够将灰渣残余掺入熟料当中，因此不会产生需要另行处置（例如在垃圾掩埋场填埋）的产成品(『巴塞尔公约2011』)。

2.4. 协同处置对于水泥与混凝土质量的影响

将废弃物用作水泥厂的燃料时，处理废弃物后产生的残留物会进入熟料，然后进入水泥，最终可能影响产成品质量。对于废弃物协同处置的水泥厂而言，产品质量包括两个方面：1) 处理废弃物产生的残留物是否会对环境构成潜在危害，比如是否会从产成品中渗出并影响环境；2) 残留物是否会影响产品的技术特征及其作为建筑材料的功能。有关国家和国际标准规定了此类产成品内残留物的限值。

水泥窑的高温可彻底摧毁城市固体废弃物和污泥中的有机成分，但是无机成分（包括金属）会进入产成品。所以，如果城市固体垃圾和污泥中含有金属，那么此类废弃物的协同处置会改变产成品内的金属含量（相对于不使用废弃物作为替代燃料的工厂而言）（EIPPCB 2010）。

因为协同处置生产的水泥和混凝土必须满足适用的国家级或国际级质量标准，因此不得用作重金属的沟槽，或者具有任何可能对环境产生负面影响的特点。此外，水泥的品质必须符合可回收标准（巴塞尔公约2011）。已有的研究数据表明，废物协同处置对熟料重金属含量的影响微乎其微，而唯一的例外便是使用轮胎作为燃料，因为这有可能提高产生品的锌含量。过量的锌会妨碍硅酸盐水泥的形成，令其迅速硬化，因此必须做相应的谨慎处理(GTZ/Holcim 2006)。

产成品所含痕量元素的行为，对于评估水泥窑废物协同处置的相关环境影响具有决定意义(CEMBUREAU 2010)。通过淋溶试验可以判定环境安全性。针对水泥所含重金属的环境影响的淋溶研究结果表明，全部水泥痕量元素(有效寿命与回收期间)的淋溶量少于或近似于最细腻的分析方法的检出限。然而，诸如砷、铬、钒、锑、钼等金属具备更强的流动性，尤其是在砂浆或混凝土结构被压碎或粉碎的时候(例如，整体作为道路集料循环利用，或服务期限过后予以填埋)(巴塞尔公约2011)。

2.5. 能源消费与废物协同处置之间的权衡

水泥行业协同处置废弃物，不但降低了水泥厂使用的化石燃料(例如煤炭)数量，同时通过避免垃圾掩埋场和焚烧炉的CO₂与CH₄排放而降低温室气体排放量(参见图7)。然而，协同处置在某些时候提高了每吨熟料的总体能源用量。这可能是由一系列因素共同作用的结果，其中最主要的是废弃物所含的水分，导致了需要额外的风扇电力消耗以处理额外的废气与处理旁路窑灰。表5和图10列举了权衡示例及额外热量消耗协同处置的细目。

表 5. 能源消费与废物协同处置之间的权衡示例(Hand 2007)

项目	A 工厂	B 工厂	差额
	仅使用化石燃料	使用化石燃料与废弃物衍生燃料 ^a (利用额外设备进行协同处置)	
具体热量需求	2.96 GJ/吨 熟料 ^c	3.27 GJ/吨 熟料	10% ^b
具体废气量	1.4 Nm ³ /kg 熟料	1.6 Nm ³ /kg 熟料	14%
通风进气口的压降	- 47 mbar ^d	- 68 mbar	45% ^e

^a参考文献并未说明废弃物衍生燃料的类别与比例。

^b参见图 10，了解此项额外能源消费的细目。

^c A 工厂 2.96 GJ/吨熟料的具体热量需求系取自热量需求范围的最小值，欲达成此数值的前提条件是干法水泥窑在极为稳定的状况下使用恰当的原材料有效率地运行一段时间。然而，一个干法水泥窑在运行一年时间后通常很难达成这一数值。B 工厂的废物协同处置亦适用于本前提条件。

^d mbar: 毫巴

^e压降可能与其他因素有关，而不单单是废物协同处置。比方说，B 工厂的二燃室需要额外的压降。尽管使用二燃室助益颇多，但并不是协同处置的必要条件。

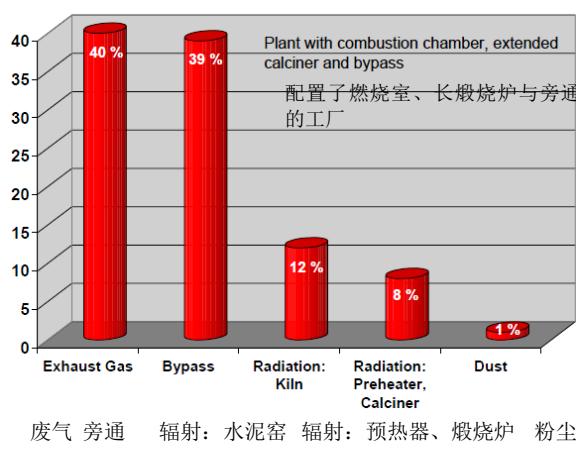


图 10. 表 5 协同处置所需的 10% 额外热量消耗的细目(Hand 2007)

2.6. 废弃物协同处置的经济性

废物协同处置的总成本包含了下列各项的成本与运营费用(U.S. EPA 2008):

- 水泥窑与设备升级
- 性能测试
- 废物预处理的材料采购与运输：倘若水泥厂收取废物协同处置费用，这项费用便为负值。
- 烟气排放连续检测系统（CEMS）
- 材料采样与测试
- 职业健康与安全（OHS）：具体的个人防护装备与培训

有些时候，上述废物预处理和协同处置的相关成本甚至高于废弃物作为能源与材料价值；因此，协同处置废弃物的水泥厂必须收取一定费用。在日本等高度重视废物处理的国家，废物协同处置利润颇丰(GTZ/Holcim 2006)。

技术标准以及国家环境政策举措，在很大程度上影响着水泥行业协同处置废弃物的经济性(GTZ/Holcim 2006)。除此之外，不同国家甚至是同一国度的不同地区的燃料价格各不相同。由此，协同处置的经济性必须视水泥厂所在区域的具体情况而具体分析。水泥厂的水泥窑类别（湿法水泥窑、干法中空窑、预热器窑、新型悬浮预热『NSP』窑）同样也影响着废物协同处置的经济可行性。湿法水泥窑与干法中空窑的能源效率不如现代化的新型悬浮预热器窑；因此，采用旧式水泥窑技术的工厂更需要降低燃料成本，方不至于在竞争中落败于新型水泥厂。

其他可能影响协同处置经济可行性的因素包括：不断上涨的化石燃料成本；区域性、国家性或国际性排放限值或碳交易计划；免于安装新废物焚化炉或管理新垃圾掩埋场而节省下来的费用；以及与替代能源相关的鼓励措施(Genon 与 Brizio 2008)。

GTZ/Holcim (2006)认为“谁污染谁治理”的原则应当应用于废物协同处置的经济分析。根据这一原则，那些制造了废弃物的单位（例如工厂）或负责废弃物清理的单位（例如市政当局）必须确保采用最佳、最环保的废物处理方式，并为此支付费用。

部分法规使得城市固体废弃物和/或污泥协同处置更具有经济吸引力。支持性法规的例子包括：限制或限定用于城市固体废弃物/污泥填埋的垃圾掩埋场数量、实行更高的化石燃料价格、征收碳排放税以及实施碳交易计划。加利福尼亚州实行了一项禁止填埋未经处理的污泥的政策，由此推动了污泥在该州的有效利用。按照加州法律规定，污泥必须先在至少60°C的温度中干燥以获得适于水泥窑协同处置的“A类生物固体”(U.S. EPA 2008)。在瑞士，出于健康方面的考虑，当局禁止了污泥的农业应用¹。

图11展示了某水泥厂燃料成本变化以及替代（二次）燃料的目标用量。图11表明了，随着价格更低的替代燃料和原材料取代了价格昂贵的煤炭和其他化石燃料，每吨熟料的能源费用在一段时间之后下降。

¹ 2012年6月，个人沟通¹ Bruno Fux, Holcim.

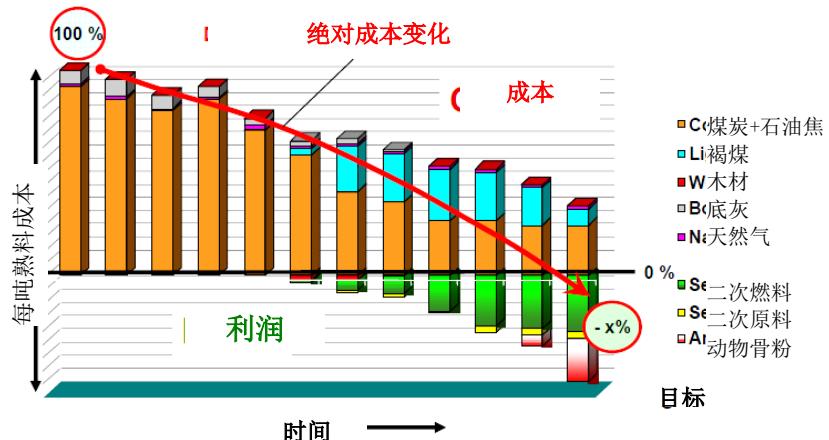


图 11. 某水泥厂随着替代（二次）燃料的使用而出现的燃料成本变化示例(Hand 2007)

劳伦斯伯克利国家实验室的中国能源小组已经开发了一款名为“水泥企业使用污泥作为能源”（SUCCESS工具）的技术—经济分析工具。这款基于Excel的工具，能够帮助决策人实施污泥协同处置计划，同时获得最好的经济环境成效。目前这款工具处于测试阶段，正在对污泥协同处置项目进行试验²。

2.7. 协同处置的健康与环境风险

水泥窑烟气排放控制的缺失，尤其是那类用于协同处置废弃物的水泥窑，可能导致极高的环境空气颗粒物浓度。当地社区曝露在这类气体之下，导致呼吸道、皮肤、胃肠疾病以及眼部感染的案例陡然增加(Karstensen 2007a)。倘若长时间曝露在高浓度的有害空气污染物（HAPs）环境下，将大大增加罹患癌症或其他严重健康疾病（包括免疫系统破坏以及各类精神、生殖、发育或呼吸道问题）的几率(U.S. EPA 2012d)。水泥窑排放的烟气同样对环境造成不利影响。例如，氮氧化物可能导致或引起地面抽样污染、酸雨、水质恶化等负面环境问题(U.S. EPA 2012d)。20世纪70年代以来，日益严苛的水泥厂烟气排放控制，在很大程度上减轻了公众曝露于有害气体排放的可能性，并且降低了有害气体的环境影响。

随着近年来水泥窑协同处置废弃物的增长，人们更加关心水泥厂处理废弃物时所排放的化学物质是否会危害公众健康。这项担忧是基于一个假设，即此类水泥厂比使用常规燃料的水泥厂排放出更多的有毒化学物质(Karstensen 2007a)。相较于使用煤炭作为燃料可能造成的后果，倘若城市固体废弃物和污泥的协同处置过程中操作正确，并且遵循严苛的环境与气体排放标准和法规，那么就无需担心额外的健康和环境风险(Rovira et al. 2011; Zabaniotou 与 Theofilou 2008; Karstensen 2008)。详情请参见第4.5.1小节与第4.6小节。

2.8. 协同处置的主要障碍

如下列出了水泥行业协同处置城市固体废弃物和污泥的部分主要障碍：

²欲了解 SUCCESS 工具的更多信息，请咨询 Ali Hasanbeig AHasanbeigi@lbl.gov 或 Lynn Price LKPrice@lbl.gov.

- **许可证:** 尽管水泥行业倾向于实施统一的协同处置排放标准，而非逐项核发废弃物协同处置的排放许可证，但对于部分危险废弃物协同处置而言，逐项合法许可证能够确保环境健康安全与合规。
- **法规与标准:** 部分国家缺乏针对水泥行业协同处置废弃物的法规与标准。许多发展中国家的废弃物管理法规执法力度不足，亦为主要障碍之一。
- **扶持政策:** 在许多案例中，倘若未考虑协同处置带来的更大层面的社会（废物管理）福祉，那么协同处置本身可能不具备经济可行性。有志于推广协同处置的城市和政府，必须基于协同处置为当地社区和环境带来的益处，制定相应的计划与激励措施。
- **公众认可:** 地方居民和团体通常将废物协同处置等同于废物焚化，因此自然而然地排斥水泥窑协同处置城市固体废弃物和污泥。人们的主要担忧通常是废弃物燃烧时产生的烟气，尤其是各类毒素。这种担忧于情于理都说的过去。国家和地方层级很有必要大概了解废物协同处置、其与废物焚化有何不同、及其潜在益处。有关当局应当公开地通报水泥厂协同处置的烟气排放检测数据与信息，以此使公众相信污染物排放符合标准。
- **成本:** RDF生产成本以及污泥预处理与协同处置的成本通常高于现有的填埋费用。然而，应当注意到大部分现行填埋费用并未充分考虑来日地下水污染或温室气体（如甲烷）排放的代价。因此，应当将此类外部成本计入填埋费用，抑或制定财务激励措施或扶持计划，以确保废弃物协同处置相较于其他废物处理/处置方式而言，具备成本竞争优势。
- **基础设施:**
 - 现有的污泥处理设施大体上基于污泥复归于体或加以掩埋。因此需要替代设施，以满足污泥运往水泥厂和预处理。
 - 城市固体废弃物来源地（地方政府）应当安装设备和制定流程，以恰当地对城市固体废弃物进行分类和制造废弃物衍生燃料。
- **缺乏合格劳动力:** 水泥厂协同处置废弃物，需要由高级专家负责安装调试设备，并且由训练有素的专业人员操作设备。目前大多数发展中国家在这方面能力有限。

3. 废物协同处置的法律、监管及制度框架：国际最佳实践

行之有效的监管和制度框架是确保水泥行业协同处置废弃物不对环境与健康产生负面冲击的重要手段。倘若协同处置的方式稳妥而环保、废弃物经合理分类及预处理、验收标准明确无虞、有效控制废物来料、防治污染的法规明确执法有力、以及实施严苛的厂址选定和许可制度，那么协同处置将成为另一种极具吸引力的垃圾处理方式，最终为水泥行业提供替代燃料和原材料。然而，因监管不力引起的违规行为，可对人类与环境健康造成负面冲击(参见第 2.7 节)。

许多发达国家运营协同处置工厂的历史始于 20 世纪 70 年代。截至 2008 年，德国水泥行业 54% 的常规燃料已为废弃物衍生燃料所取代(VDZ, 2010)，而荷兰的这一数据高达 80%。为保护废料协同处置厂邻近居民以及工厂员工的健康和安全，政府制定了各类规则、法规和标准，以规范、监督和评估工厂的行为。在日本、挪威和瑞士等国，可供废物掩埋的场地有限且资源贫乏，因此废物协同处置在这类国家的废物管理、资源保护及能源效率中发挥着重要作用(WBCSD, 2005)。

本节内容归纳了水泥行业关于两大普遍的废物燃料/原材料——城市固体废弃物与污泥——的最佳实践。以下各小节以德国、芬兰、意大利、瑞士、奥地利、法国、日本、美国、澳大利亚、巴西和南非为例，介绍了欧洲国家和其他国家成熟的法律、监管和制度框架。

3.1. 一般法律框架

针对协同处置行业利用废弃物的各项议题，有关国家和地区已经制定了法律框架和监管要求。本节将回顾国际上、主要地区、及部分发展中和发达国家已经制定并实施的主要政策法规，而后探讨和比较不同制度内不同层级的主要环境绩效要求。

在制定国际通用的危险废弃物处理和水泥行业协同处置危险废弃物的规则与法律框架的过程中，《巴塞尔公约》发挥着举足轻重的作用。《巴塞尔公约》于 1989 年通过，并于 1992 年 5 月 5 日正式生效，目的是为了处理与危险废弃物管理、处置和跨国境转移有关的各项议题。目前，世界上已有 178 个国家成为了《巴塞尔公约》的缔约国。

在 2011 年 10 月份举行的《巴塞尔公约》第 10 次缔约国大会上，与会各方通过了水泥窑环保协同处置危险废弃物的技术指南。该指南规定“唯有在危险废弃物的转移与处置方式皆为环保稳妥时，才可允许任何跨国境的出口、进口或运输”(《巴塞尔公约》，2011)。《巴塞尔公约》的缔约国有责任确保危险废弃物和其他废物的管理方式环保而稳妥。该技术指南为发展中和发达国家持续改进协同处置行业法律框架提供了重要参考。

许多发达国家业已制定了废弃物管理总体法律框架，为协同处置与废弃物管理体系的结合提供了基础。下文列举了欧盟(EU)、美国与日本的法律框架范例。

3.1.1. 欧盟

废弃物框架指令

『废弃物框架指令』(2008/98/EC)奠定了欧盟废弃物政策的基础(WFD)。欧盟所有成员国都被要求在一个固定期限内，按照该指令调整各国的相关法律。『废弃物框架指令』规定了基本理念和定义，包括废物产生预防、废物回收、废物循环与废物管理。该制定同样规定了废物管理原则，要求“废物的处理不得危害人类健康和损害环境，尤其是不得对水源、大气、土壤、植物或动物造成风险，不得产生噪声或异味等令人不悦的事物，并且不得对乡村或具特殊价值的地点产生负面影响”(EC, 2012a)。

除此之外，『废弃物框架指令』规定了一个废物管理体系（第 2.2 节图 5）。该体系以废物产生预防为重，废物回收再利用紧随其后，而填埋法属于最后的选项。水泥行业协同处置城市固体废弃物和污泥，被视为能源回收的一种，因此相比填埋法具有优越性。

废物产生预防和废物回收再利用，不应被视为与协同处置竞争或冲突。这三者都是减少日渐增加的废弃物的负面影响的总体目标。此外，必须对城市废弃物进行分类和预处理之后，协同处置才切实可行。『废弃物框架指令』规定了废物回收再利用的两大目标：生活废弃物（包括纸张、金属、塑料及玻璃）的回收再利用率在 2020 年达到 50%；以及建筑拆迁垃圾的回收再利用率在 2020 年达到 70%(EC, 2012a)。

欧盟『废弃物框架指令』同样规定了废物收集与管理的一般原则。基于“谁污染谁治理”的原则，『废弃物框架指令』明确要求废弃物制造者或持有者必须亲自进行废弃物处理或者雇佣经纪人或相关机构进行废弃物处理。通过“生产者责任延伸制”，『废弃物框架指令』还开启了废物管理市场，将废弃物处理责任从政府转移到产生废弃物的企业。

这类原则是推动协同发展的强大动力，因为产生废物的工厂（如工业公司）以及处理废物的机构（如市政当局）必须向水泥行业支付协同处置废弃物的费用。各国处理废物的价格有所不同。以日本为例，由于资源严重匮乏，该国的废物处理价格通常极高，因此协同处置工厂实现了高额的利润。

为确保顺利实施，『废弃物框架指令』要求欧盟全部成员国制定“一份或多份的废物管理方案”，方案内应包含“废物的类别、数量和来源，现行收集制度与场地标准”以及与废物产生预防相关的信息。制定废物管理方案的目的在于分析现行的废物管理方式；制定提高废物再利用、回收、循环与处置的措施；以及确定如何扶持『废弃物框架指令』的实施。除了笼统的『废弃物框架指令』之外，欧盟委员会同样颁发了若干有关于垃圾掩埋、废物焚烧、污染与工业排放的具体指令。这些指令与废弃物协同处置有关联，并且在下文进行讨论。

掩埋指令

1999 年颁布的欧盟『掩埋指令』(1999/31/EC) (EC, 2012b)是推动欧洲水泥窑协同处置废弃物的重大因素之一。『掩埋指令』的颁布，响应了人们日益增长的对于垃圾掩埋负面影响的担忧。垃圾掩埋污染了土壤、水源和大气，导致生存状况和人类健康的不断恶化。该指令的终极目标在于促进欧盟废弃物体系的实施。而欧盟废弃物体系将垃圾掩埋作为废弃物处理的最后选项。

『掩埋指令』引入了严苛的废弃物掩埋流程，包括制定掩埋分类、设定废弃物掩埋的标准接收程序（包括废弃物特征的详细描述、废弃物成分限制、浸出行为、以及掩埋场地的接收程序）(EC, 2009)、以及要求建立掩埋许可制度。『掩埋指令』同样规定了可生物降解城市固体废弃

物、液态废物及废弃轮胎的阶段性掩埋缩减量目标。各成员国有责任制定国家战略，以达成掩埋缩减量目标。国家战略的范例包括瑞典于 2002 年颁布的可燃性废弃物掩埋禁令以及 2005 年有机废弃物掩埋禁令。

由于『掩埋指令』限制了掩埋容量，因此推动市场寻求不可回收再利用的废弃物的替代处理措施。垃圾焚化和协同处置便是两个典型的措施。欧盟各国的垃圾掩埋成本有所差异，从希腊最低的 30 欧元每吨到丹麦最高 126 欧元每吨不等(Eunomia Research & Consulting, 2011)。为遵从『掩埋禁令』之规定，各国已采取各种措施调高垃圾掩埋成本。例如，芬兰垃圾掩埋的基本费用从 1996 到 2006 年上涨了百分之三百。爱沙尼亚、芬兰与意大利通过征收掩埋税的方式，限制垃圾掩埋法的应用(欧盟环境局, 2009)。

废物焚化指令

为重视公众对于焚烧垃圾所产生的健康与环境影响的担忧，欧盟委员会于 2000 年制定了『废物焚化指令』(WID) (2000/76/EC) (EC, 2009)。『废物焚化指令』的目标是通过设定垃圾焚烧厂的经营/技术要求和烟气排放限值，以期最小化废物焚化所造成的负面环境影响。

『废物焚化指令』整合了先前三个³有关于废物焚化和协同处置的指令，同时界定了焚化厂与协同处置厂之间的区别。按照『废物焚化指令』之规定，欧盟境内的焚化厂被定义为“从事于废弃物热处理但不一定回收燃烧时所释放的热量的工厂”(EC, 2012c); 而协同处置厂被定义为“主要目的是生成能源或产生实体产品，并且废弃物被作为燃料使用或进行热处理，例如水泥窑或石灰窑”(EC, 2012c)。不论何种类型的工厂都需遵守『废物焚化指令』，但亦有部分工厂享有豁免，这包括开展废物焚烧工艺改进试点的工厂；每年处理少于 50 吨废弃物的工厂；以及仅处理蔬菜废料、木材废料和放射性废料的工厂(EC, 2011a)。

『废物焚化指令』提出了与协同处置厂的许可、废物传输与接收、操作环境、大气排放限值、排水、残余、监测、获得资料与公共参与、报告及处罚相关的要求。尤为突出的是，该指令相较于之前实施的指令而言，具备了更为严苛的排放要求以及操作条件与技术要求。

综合污染防控指令

除了『废物焚化指令』的排放限值和其他具体规定之外，『综合污染防控指令』(IPPC)同样适用于协同处置厂。『综合污染防控指令』旨在通过以环境许可制度及“最佳可用技术”(BATs)为核心的综合途径减少工业污染。

『综合污染防控指令』要求定期对欧盟境内主要行业的技术状况进行评定和描述。而 BAT 参考文件正是各行业专家为响应此目的而基于欧盟委员会组织的信息交流会所制定。其中一份 BAT 参考文件与水泥及石灰行业相关(EIPPCB, 2010)；另有两份 BAT 参考文件系有关于废物(EIPPCB, 2006)：其中之一系关于废物处理行业，探讨了不同类型的废物处理技术，另一份有关于废物焚化的参考文件，涵括了废弃物热处理的最佳可用技术以及废物的处理、接收与贮存。BAT 参考文件明确承认水泥制造工艺中使用恰当的废弃物属于 BAT 范畴。

³ 包括『新型城市固体废弃物焚化厂指令』(89/369/EEC)、『现有城市固体废弃物焚化厂指令』(89/429/EEC)、以及『危险废弃物焚化指令』(94/67/EC)。

『综合污染防控指令』涵括的工厂在获得许可之前必须证明已采用了 BAT、达成一般义务（例如预防大规模污染、有效使用能源、以及限制环境损害）、满足特定要求（排放限值；采取土壤、水源及大气保护措施；以及废物管理措施）以及符合各类综合设备性能要求(EC, 2011b)。

尽管规定工厂应达成污染最小化的要求，但『综合污染防控指令』同样给予了欧盟成员国一定的弹性空间，确保环境许可机构能够考虑诸如工厂技术特点、地理区位及当地环境状况等各类因素。

『综合污染防控指令』将公众参与视为环境许可及检测的决策过程中至关重要的一环。它给予了公众接触许可申请、许可证、检测结果、及欧盟污染物释放与转移登记(E-PRTR)的权利。E-PRTR 是一个数据库，用于存放欧盟成员国提交的排放数据(E-PRTR, 2011)。

工业排放指令

工业排放指令』(2010/75/EC)是『综合污染防控指令』于 2013 年到期之后的替代指令。『工业排放指令』整合了现行与工业排放相关的七个指令⁴，同时对『综合污染防控指令』内提出的原则重新做了说明，这类原则包括了一套基于综合途径的环境许可制度、强令采取 BAT、颁证机关的弹性空间、促进公众参与许可流程、以及给予公众接触排放/污染物数据的权利。

然而，与『综合污染防控指令』不同的是，『工业排放指令』要求欧盟成员国设立一套环境监察制度、制定环境监察方案、以及视污染风险不同而每 1 至 3 年进行一次实地调查(EC, 2012d)。

3.1.2. 美国

清洁空气法

欧盟的水泥行业协同处置法规主要源于对废物生成、污染、掩埋用地不足等问题的担忧，与此不同的是，美国的协同处置法规大体上是源于环境保护议题以及 1970 年『清洁空气法』的实施。

制定『清洁空气法』是为了保护人类健康和环境免受大气中有害物质的侵害。该法案规定了美国环保局 (EPA) 必须制定空气质量国家最低标准，同时规定各州担有遵守此类标准的首要责任。未达到排放标准的地区，即“超标区”，会被要求执行专项大气污染防控措施。『空气清洁法』规定了大气固定源和移动源污染的联邦标准，同时列出了引致酸雨的有害大气污染物 (HAPs) 和排放物。除此之外，该法案规定了各类大气污染源的综合许可制度⁵。

『清洁空气法』第 109 条规定了美国环保局应制定六大污染物（即“标准污染物”）的国家环境大气质量标准。标准污染物包括：一氧化碳(CO)、铅(Pb)、二氧化氮、臭氧、PM2.5 与 PM10、及 SO₂。此后制定了两套标准：用于保护公众健康的一级标准和用于保护公众福利的二级标准

⁴包括『综合污染防控指令』、『大型焚化厂指令』、『废物焚化指令』、『溶剂排放指令』以及三个有关于二氧化钛的指令。

⁵同样的，EPA 于 2009 年 12 月 7 日签署了两份关于温室气体的调查报告（《温室气体危害调查报告》以及《温室气体危害排放》）。《温室气体危害调查报告》指出了有六种温室气体危害着当代和后世子孙的健康与福祉。然而，这两份报告并未对相关行业或公司提出任何要求。

(例如保护植物、动物与建筑免受伤害) (EPA, 2011a)。『清洁空气法』要求美国环保局每五年对标准进行一次核查。美国各州负责制定程序和措施，以满足标准之要求。按照『清洁空气法』第 110 条之规定，各州在制定州级执行法案之后，应提交予美国环保局。

『清洁空气法』第 112 条同样要求美国环保局针对已知或疑似能够致癌或致使严重健康疾病的有害大气污染物 (HAPs) 的主要源头和具体来源地制定标准。所谓的“主要源头”指每年排放/可能排放不少于 10 吨某种 HAP 的固定源，或者每年合计排放/可能排放不少于 25 吨多种 HAPs 的固定源组合(EPA, 2012a)。

『清洁空气法』第 112 条界定并管理着 188 种有害大气污染物。HAP 国家排放标准要求采用技术型排放标准；此类规定所要求的技术指最大可行控制技术 (MACTs)。美国环保局需要定期对此类标准进行核查。

鉴于水泥行业协同处置通过物体废弃物的燃烧回收了能源，因此协同处置城市固体废弃物和污泥的水泥窑必须满足如下『清洁空气法』第 129 条所规定的九类污染物排放限值。

- 镉
- 一氧化碳
- 质量基多氯二苯并二恶英/多氯二苯并二呋喃(PCDD/PCDF)，以及毒性当量(TEQ)
PCDD/PCDFs
- 氯化氢
- 铅
- 梞
- 氮氧化物
- 颗粒物
- 二氧化硫

3.1.3. 日本

日本正大力推进三类城市固体废弃物和污泥的治理：将污泥和城市固体废弃物焚化炉渣作为生产硅酸盐水泥和混凝土集料的替代原料；将焚化炉渣作为特殊水泥产品（生态水泥）的替代原料；以及将城市固体废弃物作为水泥窑的替代燃料。日本制定这类措施以应对垃圾掩埋用地匮乏、掩埋处理费用较高的不利局面；同时，这也是日本一项扶持废物再利用研究以及给予工业生态项目大量经济鼓励的政策的结果(Hotta and Aoki-Suzuki 2010; Nakamura 2007)。

日本于 1970 年通过了『废物管理和公共清洁法』。过去十年来，日本已经制定了一条推动非物质化与资源效率的综合废料管理途径。垃圾掩埋用地匮乏以及依赖于进口自然资源，是日本推动此类变革的重大因素。2000 年通过的『推进建立循环型社会基本法』实现了环保稳妥的废物管理模式与 3R（减少原料、重新利用与物品回收）模式的结合。这代表着重心从废物管理到有效材料管理的转变。

3.2. 法规与标准

制定法规和标准的目的是描述法律和指令的日常实施情况。对于水泥行业协同处置废弃物而言，严格的法规和标准在五大关键领域尤为需要：环境绩效、产品质量、废物质质量、操作实

践、以及雇员和当地居民安全健康。下文将介绍欧洲、美国与日本为应对这五大领域而制定和实施的法规及标准。

影响协同处置厂环境绩效的关键因素包括回转窑内某类金属的行为、废物进料状况、以及工厂集尘器的效率(Bolwerk 等人. 2006)。协同处置厂需要谨慎地控制废物进料的质量、持续监测排放参数、采取充分的操控、以及建立定时上报地方政府的制度。上报的资料必须清楚透明，且关于烟气排放及废物进料质量的信息必须向当地社区公开(GTZ/Holcim 2006)。

3.2.1. 环境绩效要求

回转窑内的高温确保了废弃物的有机物质几乎完全转化成二氧化碳和水，同时确保二恶英、呋喃等有机化合物的排放浓度维持在极低的水平。然而，协同处置厂的大气排放、水排放及残留物必须谨慎地进行控制、检测及上报。世界上的许多国家已经制定了协同处置厂各类污染物的排放限值，仅以下文为例。

欧盟

『欧盟废弃物焚化指令』规定了协同处置厂的重金属、二恶英、呋喃、一氧化碳、粉尘、总有机碳、氯化氢、氟化氢、二氧化硫及氮氧化物的排放限值。表 6 展示了欧盟制定的有关处理非危险废弃物或处理少于四成危险废弃物的协同处置水泥厂的排放限值（连续监测数据的日平均值）。二恶英和呋喃至少应每年测量二次，并且在工厂开业之后头 12 个月为每 3 个月一次。来自于除尘设备的灰尘，可全部或部分循环参与水泥制造过程。倘若无法或不许循环使用，那么这些灰尘在复归于土壤、用于废物稳定化及投入农业应用之前，需对其进行评估(GTZ/Holcim 2006)。倘若采取填埋法处理灰尘，则掩埋场的设计必须采用最佳可用技术。

『废弃物焚化指令』允许欧盟成员国的“主管单位”（即欧盟成员国的政府或监管机关）设置协同处置水泥厂的一氧化碳排放限值。欧盟成员国业已将排放限值融入各自的国家级标准之中。例如，德国的排放限值在『德国清洁空气标准』中作了规定(TA Luft 2002)。

表 6. 『欧盟废弃物焚化指令』规定的协同处置水泥厂大气排放限值(EC, 2012c)

日平均值 (单位: 毫克每立方米)		协同处置水泥厂限值
总粉尘数		30
HCl		10
HF		1
现有工厂 NOx		800
新工厂 NOx		500
Cd + Tl		0.05
Hg		0.05
Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V		0.5
二恶英与呋喃		0.1
SO ₂		50
TOC ²		10
CO ²	由成员国自行规定	

HCl: 氯化氢; HF: 氟化氢; NOx: 氮氧化物; Cd: 镉; Tl: 铊; Hg: 汞; Sb: 锑; As: 砷; Pb: 铅; Cr: 铬; Co: 钴; Cu: 铜; Mn: 锰; Ni: 镍; V: 钒; SO₂: 二氧化硫; TOC: 总有机化合物; CO: 一氧化碳;

注: 1 连续监测数据的日平均值; 2 倘若焚化垃圾时不产生 TOC 和 SO₂, 主管单位可予以排除。

『废弃物焚化指令』规定了协同处置厂废弃清洗系统排出水所含的 11 种受监管的污染物。污染物包括总悬浮固体物、汞、铊及铅。废水的排放限值如表 7 所示。

表 7. 协同处置厂所排出废水含有的 11 种污染物的排放限值(EC, 2012c)

污染物质	未过滤样本在所述质量浓度下的排放限值	
	95% 30 mg/l	100% 45 mg/l
汞及其化合物 (Hg)	0.03 mg/l	
镉及其化合物 (Cd)	0.05 mg/l	
铊及其化合物 (Tl)	0.05 mg/l	
砷及其化合物 (As)	0.15 mg/l	
铅及其化合物 (Pb)	0.2 mg/l	
铬及其化合物 (Cr)	0.5 mg/l	
铜及其化合物 (Cu)	0.5 mg/l	
镍及其化合物 (Ni)	0.5 mg/l	
锌及其化合物 (Zn)	1.5 mg/l	
二恶英与呋喃	0.3 mg/l	

在大部分欧盟国家中，燃烧试验通常是为了评估某项技术或工艺在降低排放方面所具备的性能；相应的熟料的质量同样获得评估，确保了废物处理过程的危险残留物不会从产生品中浸出并造成环境危害(GTZ/Holcim 2006)。

美国

按照美国『清洁空气法』之要求，美国环保局已经制定了“污染源分类”清单，其上包含了必须遵守有毒空气污染物技术要求的协同处置水泥厂。最大可行控制技术（MACT）标准是『清洁空气法』第 112 节规定之 HAP 国家排放标准的衍伸。MACT 标准，例如硅酸盐水泥窑 MACT，是为了“最大程度地缩减排放量”，同时亦考虑了成本、非空气质量健康与环境冲击、以及能源要求(McCarthy, 2005)。对于新工厂或大气排放“新污染源”，『清洁空气法』规定了 MACT 标准“不得低于实际操作中同类受控污染源所取得的最为严苛的排放水平”。对于现有工厂或大气排放“现有污染源”，MACT 标准不得低于新污染源以及“实际操作中前 12% 最佳受控现有污染源或 5 个最佳受控污染源所取得最为严苛的排放限值”。通常来说，现有污染源在标准公布之后拥有 3 年的时间以满足规范，并且对多可享受 1 年的延展期(McCarthy, 2005)。而实现自愿性提前排放缩减的现有污染源，可获得 6 年的延展期以满足 MACT 规范。

排放水平或所谓的“MACT 底线”，是美国各行业全部工厂应当达成的基准。现行 MACT 标准规定了各行业的强制排放限值，且美国环保局可按需求制定各位严苛的标准。美国环保局指出，这一“技术基准行”方法实现了“切实的、可测量的排放缩减”(EPA, 2011b)。基于 MACT 标准，美国环保局进行了多次风险评估，以确定技术基准型排放限值如何实质降低健康与环境风险。

美国水泥行业的排放标准如『联邦规章典籍』第 40 篇（环境保护）第 60 节（新固定污染源的性能标准）第 F 段（硅酸盐水泥厂性能标准）所规定。该标准适用于水泥窑、熟料冷却机、生料立磨系统、终粉磨系统、生料烘干磨、生料仓、熟料仓、成品仓、输送机运转点、装袋机、散装水泥装卸系统(清洁空气法, 2012)。表 8 展示了颗粒物、氮氧化物与二氧化硫的美国排放限值。

表 8. 美国水泥厂排放限值(清洁空气法, 2012)

污染物	水泥窑	熟料冷却机
颗粒物 (PM)	0.15 kg/吨水泥窑进料 (干式)	0.05 kg/吨水泥窑进料 (干式)
	0.005 kg/吨熟料 (30 天持续运转之平均值)	0.005 kg/吨熟料 (30 天持续运转之平均值)
氮氧化物 (NOx)	0.75 kg/吨熟料	-
二氧化硫 (SO ₂)	0.2 kg/吨熟料	-

『1990 年清洁空气法修正案』新增第 129 条，解决了固体废弃物处理单元的烟气排放问题。该修正案规定了新工厂的排放标准（新污染源性能标准）以及现有工厂标准（排放指南）。后者并不直接规范现有排放源，而是要求各州政府执行排放指南。新污染源表现标准与排放指南同样采用了与『清洁空气法』第 112 节类似的方式(EPA, 2012b)。

2007 年之前，美国处理非危险二次材料的协同处置水泥厂都受到『清洁空气法』第 112 节之硅酸盐水泥窑 MACT 标准所规范。然而，美国某上诉法院于 2007 年裁定美国环保局“将处理固体废弃物以回收能源的单位排除在『工业与商业固体废弃物焚化规则』之外的行为是错误的”(EPA, 2008)。作为对法院裁决的回应，美国环保局提出了“非危险固体废弃物定义规则”，其中规定了在处理单元中焚烧的何类非危险二次材料可视为固体废弃物。根据该规则对于非危险固

体废弃物的定义，水泥厂处理非危险固体废弃物的行为受制于『清洁空气法』第 129 节之新固定污染源性能标准与现有污染源（工业与商业固体废弃物焚化『CISWI』单元）排放指南，而非第 112 节规定之硅酸盐水泥窑 MACT 标准。

目前已制定了两阶段法以调控 CISWI 排放，包括处理非危险固体废弃物的水泥厂的排放。作为第一阶段，EPA 制定了技术基准型 MACT 排放标准。美国环保局需每五年对此类标准进行一次必要的核查。作为第二阶段，美国环保局需进一步确定是否需要修改标准以“提供充分的保护公众健康的安全余地”(U.S. EPA, 2011c)。水泥窑 CISWI MACT 标准是基于 12 个窑炉，其中包括一个湿法窑、四个预热器窑、以及七个预热/预分解窑。处理轮胎、废油、生物质以及木材废料的窑炉，不算在 CISWI 标准的范围之内，这是由于此类原料不属于 2007 年颁布的『工业与商业固体废弃物焚化规则』之“非危险固体废弃物”的定义。

CISWI 标准最终版本于 2011 年 3 月 21 日发布并生效。然而，美国环保局收到了许多团体要求重新审视相关规则的请愿书。随后该局确定了需重新审视的若干议题，并于 2011 年 5 月 18 日宣布该标准生效日期予以延迟，直至“此类规则的司法复审议程终结或美国环保局完成了此类规则的再次审定”(EPA, 2011d)。2011 年 12 月 23 日，美国环保局提出了 CISWI 标准的修正案，其中包括了分类（如水泥窑类别）再次审定、修改一氧化碳检测要求、定义解释、以及协同处置水泥厂排放限值的拟议修正。表 9 展示了延缓实施的 2011CISWI 标准以及拟议的水泥厂排放限值修正。

处理危险废物的协同处置水泥厂需遵守『清洁空气法』第 112 节之危险废弃物焚烧单元规范。该规范，即“危险大气污染物国家排放标准：危险废弃物焚烧单元之危险大气污染物最终标准”，系于 2005 年 10 月制定，要求处理危险废物的水泥窑符合 HAPs 排放标准。HAPs 包括砷、铍、镉、铬、二恶英与呋喃、氯化氢、氯气、铅、锰及汞(U.S. EPA, 2005)。

表 9. 美国协同处置窑 2011CISWI 标准之 MACT 排放限值(U.S. EPA 2011c and 2011e)

污染物(单位)*	2011 CISWI 排放限值 (延缓执行)		2011 CISWI 排放限值 (拟议修正)	
	现有水泥窑	新建水泥窑	现有水泥窑	新建水泥窑
氯化氢 (ppmv)	25	3.0	3.0	3.0
一氧化碳 (ppmv)	110	90	410 (预热器/预分解器)	320 (预热器/预分解器)
铅 (mg/dscm)	0.0026	0.0026	0.0043	0.0043
镉 (mg/dscm)	0.00048	0.00048	0.00082	0.00082
汞 (mg/dscm)	0.0079	0.0062	0.011	0.0037
可过滤颗粒物 (mg/dscm)	6.2	2.5	9.2	8.9
二恶英与呋喃总量 (ng/dscm)	0.2	0.090	3.6	0.51
二恶英与呋喃毒性当量 (ng/dscm)	0.0070	0.0030	0.075	0.075
氮氧化物 (ppmv)	540	200	630	200
二氧化硫 (ppmv)	38	38	830	130

*ppmv: 体积百万分之一; mg/dscm: 毫克每干燥标准立方米; ng/dscm: 毫微克每干燥标准立方米.

澳大利亚

澳大利亚维多利亚州管辖着澳大利亚境内仅有的一家协同处置污泥的水泥厂（位于 Waurn Ponds）的许可与执照审批。澳大利亚各州政府几乎控制着环境法规的制定与实施(Anton, 2008)。而与水泥厂业务相关的联邦法规仅管理着水泥厂每年上报『国家污染物排放目录』所规定的污染物质数据，以及要求水泥厂遵守于 2012 年 7 月 1 日生效的国家碳排放税收。此外，诸如污染物排放限值与环境影响评估要求等环境法规严格属于州政府的权利范围。大部分的废弃物、垃圾掩埋场、机工作安全等法规亦属于州政府权利范围。水泥与混凝土产品质量标准则由一个国家级非政府的标准化委员会（即澳大利亚标准）负责制定。

博罗水泥公司位于维多利亚州 Waurn Ponds 的工厂自从 20 世纪 90 年代初便采用替代燃料，包括轮胎、废油、动物脂肪残余、铝业碳废料、炼油业催化剂废料、以及废弃的铸造用砂(博罗水泥, 2011)。2006 年，该工厂开始研究重新利用污泥处理厂生物固体作为水泥窑燃料的可行性(APP, 2010)。废物特征研究表明了生物固体内汞含量甚高，是导致该项目无法实施的首要障碍。工厂管理层探索了各类技术方案，以求污泥的使用不会提高工厂现有的汞排放水平（这是工厂管理层实施为维持与当地社区的良好关系而实施的内部排放限值）(McGrath, 2012)。在某次试运行中，废弃物的处置和进料都标准化操作，且一项由 Hansom Environmental Products 提供的技术经证明能够成功地降低 98% 的汞排放量，同时大幅降低其他污染物质的排放。受到这类试点项目成功的鼓舞，博罗公司对于扩大项目规模充满着热忱。然而，扩大项目需要大量的资金投入。

运往该厂的生物固体并不被视为废弃物，因此该厂免于受到与废物处理厂同等的管理，而仅有烟气排放受到维多利亚州环境保护法与许可要求的规管。该厂历来与当地社区及维州环境监管单位（维多利亚州环保局 EPAV）保持着良好的关系。该厂实施生物固体项目的部分推动力，来自于 EPAV 要求污水处理厂探索水泥厂协同处置的压力(McGrath, 2012)。直到不久前，该厂的经营许可证仍规定了控制燃料投入，同时应遵守维州法律的排放限值。最近，这类规定随着工厂业主被施加义务要求采取风险型环境管理方式而发生改变。在准备风险评估时，该厂必须在监管机构颁发许可之前充分考虑来自当地社区的意见；当地社区的反对意见可能导致许可证被大幅延迟甚至遭到拒绝。许可证规定了工厂必须定期提交实际排放量与负面环境影响报告(McGrath, 2012)。作为一项指南，该厂换领的执照（2011 年 11 月）要求遵守欧盟『废弃物焚化指令』2000/76/EC 的排放限值(维州环保局, 2011)。此外，澳大利亚水泥行业协会要求所有的会员单位遵照世界企业永续发展委员会(WBCSD)颁布之“水泥制造过程中燃料与原料的选择与使用指南”，转而使用替代燃料和原料（澳洲水泥行业协会, 2009）。目前已召开数次利益相关方会议，以确保当地社区了解并支持该生物固体项目。这类会议也极大地激励了该厂保持现有的低排放水平。年度上报程序如维州指南所规定。

南非

2009 年，南非环境与旅游部公布了『国家关于普通及危险废弃物热处理的政策』(下称南非国家政策) (Crous, 2009a)。这一极为详致的政策取代了先前由各省制定的关于废弃物协同处置的莫衷一是的要求(Karstensen, 2007b)。该政策参考了欧盟 2000/76/EC 『废弃物焚化指令』（尤其是有关于大气排放限值的规定）及其他国际政策，包括 WBCSD 与 Holcim 的协同处置指南。除了详致重述现有法律规定许可与经营要求之外，该政策同样规定了水泥制造业应采取的各类

最佳可用技术与最佳环境实践，包括协同处置的烟气排放控制。南非各省有权颁布比中央政府环境法律更为严苛的法规，因此增加了除国家政策规定之外的监管责任(Karstensen, 2008)。

如表 10 所示，针对现有和新建协同处置厂的某类标准空气污染物、重金属、二恶英与呋喃，南非国家政策同样规定了最低大气排放限值。现有获准进行废弃物协同处置的工厂，拥有 10 年的时间以符合新建工厂需执行的排放标准。空气质量管理方案需按要求详细说明：工厂设计与运营；检测设备与最低可用性；具体气体的检测频率要求；报告单位、格式与频率（每季度一次自评，每年一次独立审计）；以及重金属、二恶英与呋喃等特殊检测项目。对于含有高浓度持久性有机污染物质的废弃物，需要对其另行测试和验证。使用这类废弃物时，需保证至少达到 99.99% 的摧毁率。

南非国家政策是全世界最为严苛的政策之一，但该政策的措辞仍有改进空间，以阐明此类措施是建议性或强制性。由于南非境内仅有 11 家水泥厂，因此任何协同处置许可审批都需要与省级和国家级监管单位进行密切合作。政策制定者在指定南非政策的过程中，更多的关注于危险废弃物而非城市固体废弃物的协同处置。虽另有处理城市固体废弃物的详细措施，但是此类工艺会否最终促进城市固体废弃物协同处置仍不明朗(Crous, 2009b)。

表 10. 南非专用焚化炉焚烧普通与危险废弃物以及水泥生产过程协同处置普通与危险废弃物作为替代燃料的大气排放标准（南非环境事务部，2009）

污染物(单位)*	专用焚化炉焚烧普通与危险废弃物的大气排放标准	水泥生产过程协同处置普通与危险废弃物作为替代燃料的大气排放标准
PM(总颗粒物)	10	30 ⁱ (80) ⁱⁱ
TOC	10	10 ⁱⁱⁱ
CO	50	
HCl	10	10
HF	1	1
SO ₂	50	50 ⁱⁱⁱ
NO _x	200	800 ^{iv}
NH ₃	10	
Hg	0.05	0.05
Cd + Tl	0.05	0.05
SB, AS, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V(总计)	0.5	0.5
PCDD/PCDF(ng/Nm ³ I-TEQ)	0.1	0.1

* 除非另有说明，否则 mg/Nm³ 指浓度(日平均值)。且“标准”状况下为 10% O₂, 101.3 kPa, 273 K/0 °C 干燥气体。Mg/Nm³: 毫克每标准立方米; I-TEQ: 国际毒性当量。

ⁱ PM 限值针对 (a) 协同处置 AFR 的新建窑炉 (本政策颁布之后兴建的)，以及 (b) 本政策公布之前 10 年内协同处置 AFR 的现有窑炉。

ⁱⁱ 倘若 AFR 协同处置并未提高现有的颗粒物排放量 (如基线监测所设定)，那么针对协同处置 AFR (包括 POP 废物) 的现有窑炉的 PM 限值，可在本政策公布三年生效后方才生效。

ⁱⁱⁱ 倘若 AFR 协同处置并未提高现有的 TOC 或 SO₂ 排放量 (如基线监测所设定)，那么 TOC 限值或 SO₂ 限值不适用于因使用常规燃料或常规原料而造成排放量陡增的工厂，即不适用于协同处置 AFR 的水泥厂。

^{iv} PM 限值针对 (a) 协同处置 AFR 的新建窑炉 (本政策颁布之后兴建的)，以及 (b) 本政策公布之前 10 年内协同处置 AFR (不含 POP 废物) 的现有窑炉。前提是现有的氮氧化物排放量 (如基线监测所设定) 不会因为协同处置 AFR 而增长。

3.2.2. 产品质量要求

第 2.4 节介绍了水泥生产过程中使用城市固体废弃物与污泥可能对产成品痕量元素浓度造成的影响。视废弃物类别与总用量的不同，痕量元素浓度可能随着采用传统燃料制造的水泥的成分而上升或下降。

产品质量要求是为了确保水泥行业采用废物衍生燃料不会对健康或环境造成负面影响，不会降低水泥或熟料的材料成分，同时不会对水泥作为建筑原料的重要技术属性造成影响。

如第 2.4 节所介绍，相关研究已经确定了水泥产品品质监管规范制订过程中应当遵循的三大普遍原则：

- 产品 (熟料、水泥、混凝土) 不得被滥用作重金属的沟槽。
- 产品不得对环境造成任何的负面影响。
- 水泥的品质需符合可回收标准。

倘若协同处置方式环保而稳妥，那么城市固体废弃物与污泥的使用，据说对熟料重金属含量的影响微乎其微(GTZ/Holcim 2006)。德国有关研究表明，重金属被牢牢地固定于水泥砖矩阵之内(Bolwerk 等人. 2006)。然而，产品贮存于特定或极端环境时测得的部分气体释放可能对环境造成影响 (Bolwerk 等人. 2006)。

为避免负面的产品质量影响，投入水泥窑的废弃物的品质与类别应当受到谨慎控制，且应当限制废物进料的重金属含量。协同处置厂应制定质量控制体系，确保水泥窑的运行环保而安全。废弃物通常需要进行预处理（例如干燥、破碎、混合、粉磨或均化）和质量保证(CEMBUREAU, 2009)。所有此类事项可在规范中予以处理。

欧盟

欧盟法规要求经协同处置工序生产的水泥产品应符合全部适用的质量标准，包括 EN 197-1 协调标准：水泥成分、规格与合格标准(CEMBUREAU, 2009)。

在德国，水泥产品（熟料、水泥与混凝土）必须满足州级建筑法规、『建筑产品指令』、以及『建筑产品法』（该法系基于『建筑产品指令』）。VDZ，即德国水泥行业协会，是负责水泥产品测试、检验与认证的机构。VDZ 下辖一个质量调查组织以及一个测试实验室，同时作为检验与认证机构(VDZ, 2010)。水泥行业品保部研究所负责检验与测试活动，而 VDZ 质量调查组织技术委员会每两年对第三方检验结果进行一次讨论(VDZ, 2010)。VDZ 的质量调查组织自 2002 年起就是 EN 45001 授权的产品认证机构。此外，所有的实验室测试都获得国际标准化组织（ISO）17025 认证。质量调查组织定期受第三方评估。

3.2.3. 废物质量要求

与来源单一的工业垃圾相比，城市固体废弃物由于成分繁杂而难以处理。相关研究表明，未分类的家庭垃圾不适于水泥厂协同处置(IMPEL Network, 1998)。

协同处置厂必须制定废物分选标准，以保证工厂在预处理时能够符合操作与产品质量要求(IPTS, 1999)。不同类别的废物，对熟料或水泥质量的影响各不相同。参见附录 3，了解水泥厂“接受-拒绝”图表范例。

为了在维持稳定质量的同时，最小化废物进料所含的污染物质，协同处置厂经营方必须制定一套评估与接收程序，用以收集废物来源的基本信息以及废物物理化学特性的详细数据，例如发热量、灰渣、痕量元素（如汞）含量等。同时必须获得与运输、处理和使用过程相关的健康、安全与环境信息。工厂经营方必须定期取样分析水泥窑的进料与出料。

工厂经营方必须着重检查下类元素在废物中的含量，因为这类元素极大地影响着产品质量(WBCSD, 2005 与 GTZ/Holcim 2006):

- 磷酸盐，其影响着硬化时间
- 氯、硫与碱，三者影响着总体产品质量
 - 氯浓度超过 0.7%时影响熟料的强度。
 - 氯可加速设备腐蚀。
 - 氯影响着水泥与混凝土的总体质量。

- 铬，其可引起过敏反应。

允许水泥窑使用废弃物之前，监管单位与工厂经营方必须清楚地明白下列问题的答案（Bolwerk, 无日期）：

- 何类废物适于在水泥生产工序中使用？
- 废弃物来源？
- 废物含有何种污染物质？
- 废弃物的下列特征各如何：发热值、水分、重金属含量、氯含量等（参见上文的重点成分清单）？
- 废物供应商能否保证废弃物质量稳定在某一范围？
- 预计处理废弃物会产生多少烟气排放？
- 使用废弃物作燃料时，何种有害物质可能包含在熟料或水泥中？

欧盟

德国已经制定了诸多体系，用以评估和控制废物衍生型替代燃料的适宜性。这类体系主要关注于废物所含的衡量元素与氯含量。合格的氯浓度应在 1% 到 2% 之间，具体视工厂的不同位置而定。对于水泥行业采用的废物衍生燃料，德国已经引入了认证标签。荷兰、意大利与芬兰同样制定了废物衍生燃料的质量标准。

瑞士环境、森林与景观局于 1998 年发布了『水泥行业处置废弃物指南』；该指南于 2005 年更新，并且确定了熟料与硅酸盐水泥的污染物含量值。协同处置厂超过指南规定的污染物含量值时，就必须减少废物的使用量。

3.2.4. 操作要求

欧盟『废弃物焚化指令』要求协同处置厂的协同处置烟气“至少在两秒内维持不低于 850°C”。协同处置过程产生的废热亦应当“尽可能”地加以利用。应当采用过程控制技术对焚烧过程进行持续监测。

为了抑制或控制含有挥发性有机化合物的废物，必须在密闭罐或容器内或在合理空气流通条件下，对此类化合物进行贮存或处理。通常用于捕集挥发性有机化合物排放的技术包括液氮冷阱、生物处理、活性炭过滤器、以及热处理(GTZ/Holcim 2006)。

欧盟

在德国，所有的工艺都必须符合低排放设计，并且通过记录工艺参数进行检测。下列由德国提出的要求，是基于无数的德国案例研究（IMPEL Network 1998）：

- 焚烧过程必须通过现代化的过程控制技术进行持续监测。
- 废料运抵工厂时，需对其进行固定检验以及全方位的初步均质化处理。
- 废料分析的主要参数（例如发热值、化学成分），必须半连续式地输入过程控制系统。
- 进料枪的设计保证能够不偏不倚地加入废物。
- 控制单元必须能够分别控制主燃料与废燃料。
- 废燃料的添加必须在额定输出范围内的正常持续运转期间。

南非

在南非，工厂同样必须另行制订经认证的运营与环境管理方案(Karstensen, 2008)。这类方案明确规定了废弃物验收、装卸与处理；培训与记录；废弃物、替代燃料与原材料分拣及分析；过程控制；检测设备及认证与维修计划表；排放检测策略与计划表；废物喂料、设备开停车、员工健康检查、及环境取样的操作流程；以及运营与环境管理方案更新程序；等各项活动的负责人。危险废物处理要求更加严苛和具体的制度。废物管理方案的制定同样需要根据相关的装卸、分类、废物处置等国家政策，包括废物贮存的具体法规与标准；运输承包商许可要求；以及记录废物来源、提及、物理特征、分类、风险（如危险化学品法律所界定）、发热值、运输方式、贮存方式、预处理手段、与喂料方式。

3.2.5. 安全与健康要求

操作与管理人员必须获得充分的资源和培训，以确保协同处置系统的平稳和高效运行。必须采取诸如操控监测、个人防护设备、储存设备等防护措施，以最小化可能对员工和当地居民造成的风险。

必须制定针对员工和工厂的操作、维护与安全程序。此类程序必须定期检查、更新或修改，以确保其充分实施以及满足不断变化的操作条件之需要。同样也需要制定稳妥的应急程序。

为评价可能对人类健康和生态系统造成的潜在排放危害，葡萄牙 Intertox 水泥公司进行了一次基于“累积不利事件”引发的“最坏情况”的风险评估(CEMBUREAU, 2009)。该评估通过建立排放水平模型，以探究可能对员工健康及环境造成的风险。美国 Holcim 水泥公司制定了 ECHO（化学工业职工健康与职业安全）计划，以监测从事废物处理的员工的身体健康状况。

3.3. 制度框架

各国监管与执法责任的分配方式各不相同。以美国为例，美国环保局监管着全美水泥行业协同处置的烟气排放，或者将此项权利下放给州级或地方环保局。然而，美国环保局保留着排放标准、排放测试方式变更、排放监测变更、以及记录与报告变更的审批权力(CAA, 2012)。

美国关于大气排放的核心法规是『清洁空气法』。这部综合性联邦法律于 1970 年制定，监管着固定污染源与移动污染源的大气排放。州级与地方空气质量机关被授权为『清洁空气法』大部分要求的首要许可与执法机构。美国环保局负责监督各州与地方的行为，以确保“全国上下一致遵守『清洁空气法』的法律原则”(U.S. EPA, 2011f)。

在大部分欧盟成员国中，监管与执法责任分属于诸多不同的“主管单位”。在奥地利、德国、比利时、保加利亚等成员国，监管职能在国家/联邦层级与区域/各州层级之间进行划分。在丹麦、匈牙利等国则由区域机关执行工业设施的主要控制职能。而捷克共和国、荷兰、英国与爱尔兰的监管职能则由市级/地方机关负责执行。

3.3.1. 废物收集与管理

综合废物管理是一个在世界各地广为认同的关键理念。它意味着废物从生成到最终处置的全部阶段，都必须在针对某一阶段做决策时予以通盘考虑。综合废物管理同样意味从全部利益相关方的角度看待问题：社会、经济、环境、技术、政治与制度。

综合固体废弃物管理是为了创造一个清洁而安全的邻里环境、提高资源利用率、通过减少最终废物处置量而节约废物管理成本、以及创造生意机会与经济成长(Memon, 无日期)。

协同处置必须作为地方和国家级废物管理理念与战略的不可分割的一部分(GTZ/Holcim 2006)。水泥行业协同处置城市固体废弃物与污泥的目标是提高资源效率、减少化石燃料消耗、以及降低温室气体排放。然而，水泥行业使用废弃物不得成为绕开有关废物处理或处置的法律的手段。如上文所述，并非所有类别的废物都适合于协同处置。

日本

日本的综合固体废弃物管理方案包含如下内容（详情如图 12 所示）（Memon, 无日期）：

- 政策（监管、财政等）
- 技术（基础设备与操作要求）
- 自发措施（意识/教育、自我管理）
- 涉及废物管理方方面面的管理体系（废物生成、收集、转移、运输、分类、处理与处置）
- 废物特征与数量的资料数据（包括未来趋势）
- 评估现有废物管理体系，以判定其是否满足运营阶段的全部需求

日本地方政府通常负责实施国际级空气质量标准与市级废物处理许可制度，并且有权制定比国家标准更为严苛的法规。日本致力于协同处置城市固体废弃物与焚化炉渣，最早可追溯至 20 世纪 90 年代日本通过『促进可回收资源利用法』（下称回收法）以及 1991 年通过『废物处置与公共清洁法』（下称废物处置法）。先前实施的废物处置法规定了工业废物制造方（即工业公司本身）而非市政当局应负责工业垃圾的收集、处理与处置，同时推进工业公司实现废物再利用。市政当局有责任规划和实施城市固体废弃物收集、处理与处置体系。由此，市政当局可通过法律要求进行垃圾分类，并制定垃圾分类费用。市政当局的这一权力在 1991 年通过的废物处置法修正案中得到了强化。回收法制定了废物回收再利用的目标，即采用早期基准体系推进市政府制定扶持废物回收的项目。随着 2000 年『推进形成循环型社会的基本法』的通过，工业垃圾再利用的促进措施得到了加强。此外，于 20 世纪 90 年代末与 21 世纪初通过的为数众多的关于推动具体产品或材料回收再利用的法律，也进一步促进了废物循环使用(OECD 2010)。

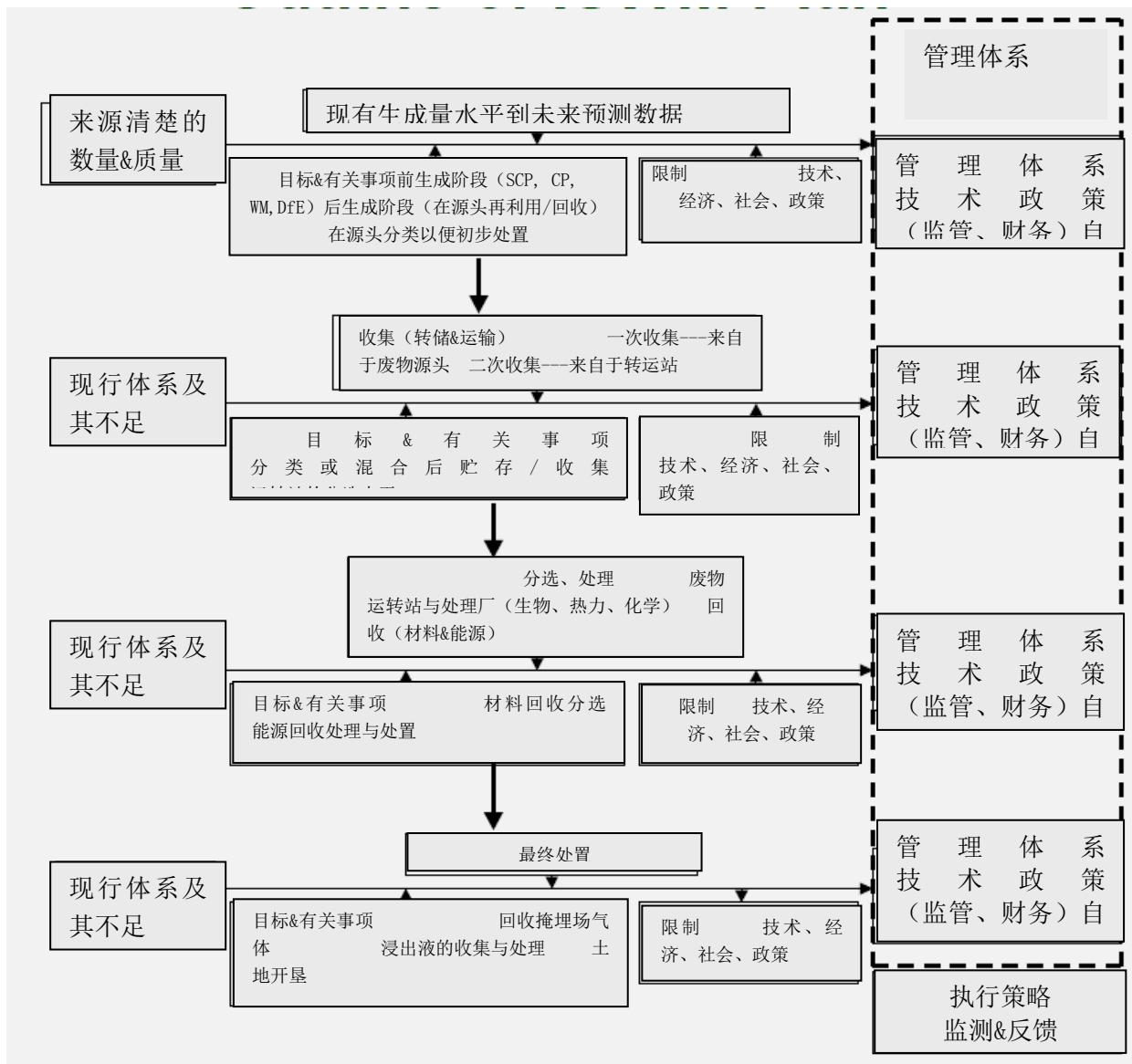


图 12. 日本综合固体废弃物管理方案概要(Memon, 无日期)

日本国内近年来取得了协同处置进展以及较高废物循环利用率的背后，是法律框架的两大重要元素：政府为废物管理方案与技术的研究、开发与执行提供资金；以及要求对废物数据进行标准化收集与分析以确定回收再利用的可行性。『废物处置与公共清洁法』的系列修正案，为在辖区内从事废物相关工作的城市提供财政扶持，包括设置废物处理承包商的许可申请要求，以及为普通废物掩埋场与焚化炉提供津贴。市级监管单位根据国家级垃圾掩埋标准，制定了普通废物掩埋场的建设与运营标准。工业垃圾处理厂与掩埋场的许可审批由省级政府管辖。

1991 年『废物处置法』同样对信息收集与传播做了重要规定。该法律要求市政府领导人在充分收集数据的基础上制定短期和长期废物规划，同时赋予了市政府更大的权利要求大型垃圾制造方进行类似的规划活动。2003 年通过的『废物处置法修正案』要求设区市制定废物管理方案，这代表着此类扩展规划与信息收集的努力已然起了作用。

为促进回收能力的快速发展，1991 年『回收法』要求中央政府设立专门的委员会以制定针对具体行业与产品的回收指南，并且定期对所取得的进展进行回顾。2003 年通过的基于一系列法律命令的『推进形成循环型社会的基础方案』，要求中央政府制定经济物质流指标用以检测最新进展，并且每年对所取得的进展进行回顾。2008 年对该物质流指标进行了重大修改和强化。数据搜集与标准化，外加各市垃圾缩减促进委员会以及行业团体发展，无疑令日本水泥行业协同处置更具有吸引力。

日本城市固体废弃物处理市场，一直以来都是被“废物变能源”方案以及简单的焚化炉所主导(OECD 2010)。促成日本“废物变能源”焚化向水泥行业协同处置转变的关键因素，是建立城市固体废弃物处理厂和工业垃圾制造方与水泥厂的直接联系。对关闭城市固体废弃物焚化炉感兴趣的城镇孤立的努力，以及为最大程度抓住工业垃圾再利用机遇而经特地规划的区域，是此类联系的形式(Taiheiyo 水泥公司 2006; OECD 2010)。

大部分日本污泥都采用焚化处理，且有大量的污泥灰渣被用于标准硅酸盐水泥的生产(Ozaki & Miyamoto. 无日期)。除了将焚化炉渣用于硅酸盐水泥生产之外，名为 Taiheiyo 的日本水泥公司已经开发出一种称为生态水泥的特殊协同处置水泥产品。Taiheiyo 是 20 世纪 90 年代日本首家研究水泥原料与焚化炉渣化学相似性的公司。2001 年，该公司成立了日本首个在生态水泥中大量掺入城市固体废弃物焚化炉渣的工厂，并且获得了日本中央政府的巨额津贴。制造该产品需要制定全新的产品标准，因此于 2012 年完成了 JIS R 5214:2002 日本工业标准的制定工作(Batelle 2002)。

生态城政策是日本近年来将水泥协同处置与工业规划政策直接融合的手段。生态城理念⁶，是因日本经济贸易产业省与日本环境省于 1997 年制定的津贴制度而产生的一个理念(全球环境中心基金 2009)。市政当局联合当地行业利益相关方制定生态城方案，而后由经济贸易产业省与环境省联合审核批准或驳回。一旦获批，相关项目将获得两省的大量财政支持，并且由地方政府与利益相关方负责项目实施。津贴额度从占“硬件”项目（设计更换设备以提高回收再利用水平）总费用 1/3 到 1/2 不等。这类规划，可建立工业与城市废弃物制造方和水泥厂的直接联系并获得津贴。对于生态城理念以及国家政府津贴的追求，促成了川崎市一家协同处置水泥厂的建造(Hashimoto 等人 2010)。

日本水泥行业拥有着较高的废物协同处置价格，因此在日本的废物管理实践中随处可见水泥行业的身影。截至 2005 年，日本拥有 32 家水泥厂，年生产能力达 219 万吨。日本正逐步提高废物利用率及水泥行业副产品使用率。2005 年，有 10% 的燃料来源于废弃物转化。截至 2009 年，日本水泥厂使用了约四十万吨的废旧塑料以及将近五十万吨的木屑。而在 2000 年，这两数据分别仅为 10.2 万吨与两千吨。

欧盟

上文介绍的“谁污染谁治理”原则受到大部分经济合作与发展组织成员国及欧盟国家的认同，并且已载入『里约环境与发展宣言』。基于该原则，废物或污染物的制造方必须承担相应的环境

⁶ 称为“城”可能词不达意；生态城实际上大多为工业园区。许多大型工厂在园区内彼此紧邻运行，废弃物处理流程是整合的。

损害赔偿责任。例如，瑞士采取的塑料袋收费措施不但遵从了“谁污染谁治理”原则，而且为该国的废物管理体系提供了资金来源(瑞士联邦, 2009)。

如上文第 3.1.1 节所介绍，盟颁布的『掩埋指令』要求所有成员国分选城市固体废弃物中的可生物降解部分。这主要通过垃圾分类、成立垃圾分选厂、或使用协同处置等其他垃圾处理方式得以实现(Gendebien 等人. 2003)。

我们已经在上文中指出，城市固体废弃物与污泥的分类与预处理，对于产成品质量及预防环境影响而言具有重要意义。为了实现水泥窑的稳定运行，很重要的因素便是确保一致的废物质量，包括充分发热值与低重金属含量（例如汞与铊），以及确保废物适合在水泥窑内处理。未分类的城市垃圾因太过于混杂，而无法用于协同处置。可燃废物可在分类之后(GTZ/Holcim 2006)，按上文有关产品质量一节所介绍的方式进行预热处理。在欧盟国家，废物供应商及废物处理厂通常在对废物进行初步处理后，将其运往协同处置厂作为替代燃料(CEMBUREAU, 2009)。

欧盟水泥行业协会指出，在对废物进行分类之后，即将被协同处置的废物必须不含有任何污染物质，且残余杂志的比率不得超过 1% (CEMBUREAU, 无日期)。为达到这一目标，废物分选与收集系统应实现标准化。例如，澳大利亚的全部九家水泥厂都使用固体废弃物（可回收塑料、纸张、纺织品与复合材料），他们通过与废物管理公司合作成立废物预处理厂，以保证废物供应能稳定地满足质量规范(CEMBUREAU, 2009)。

有关机构在与专家学者和贸易团体进行协商之后，应当公布一份允许用于协同处置的废物清单。该清单必须明确城市固体废弃物与污泥被用作水泥厂燃料所需满足的各类要求。这份清单必须机遇当地的废物处理情形，同时由有关机构和专家学者进行定期审查。

法国于 1975 年颁布的『法国废弃物法』是法国首部规管协同处置业务的法律。自此以后，需要对水泥厂使用的废物燃料进行“从头到尾”的跟进。法国于 1985 年起要求实行废物预处理(Bernard, 2006)。

应当制定协同处置厂接受废弃物的标准程序，包括废物表征、取样、测试、及一致性测试。对于协同处置厂来说，获得充足而长期的特性稳定的城市物体废弃物与污泥供应尤为重要，这是因为稳定的废物进料是确保水泥窑正常运转的必要条件。更甚者，由于水泥厂可能需要投资大笔资金改造物料处理系统以适用于某类特定废物，因此更应当保持稳定的废物进料以确保这笔资金“物有所值”。

3.4. 许可与性能审批

欧盟

欧盟法律要求计划进行废物处理的工厂获得一份政府许可证。该许可证确定了工厂可处理的废物数量与类别、废物利用的技术要求、安全与预防措施、工厂协同处置能力、以及污染物质取样、测量与控制的信息和流程。欧盟指令同样要求协同处置厂以高水平的能源效率运作(EC, 2012e)。许可证有效期为 3 到 5 年。许可制度的实行，需要成员国或“主管单位”制定基于当地情况的具体要求(EC, 2011a)。

为避免重复工作，许可证可用于诸多目的，如控制大气与水污染物及其他环境影响。倘若有关机构认为提议的水处理法未能充分地保护人体健康与环境，那么许可证申请可能遭到拒绝。如图 13 所示，许可证办理流程分为若干步骤，即申请、评估、发放、跟进以及培训/指导/联网。

在大多数欧盟成员国，协同处置厂必须申请废弃物/环境许可证。在某些国家，协同处置厂必须申请 IPPC 许可证（英国）或执照（德国）。英国与西班牙要求进行环境评估与公众座谈，而其他国家则简化许可程序（如意大利）与颁布特定法规（如葡萄牙）以促进协同处置厂利用城市固体废弃物和污泥(Gendebien 等人. 2003)。

在英国，许可证的监管机构要求协同处置厂经营方提交排放性能定期报告。任何违反排放限值的行为必须在发生后 24 小时内上报监管机构。监管机构同样巡查协同处置厂，包括检查运营细节、检测设备与排放水平。未遵守相关规定的协同处置厂将面临刑事诉讼、罚款到监押责任人等程度不等的处罚(Defra, 2006)。

在德国，水泥窑受『联邦排放控制法』规管。该法是空气质量、减噪与工厂安全等综合法规的基础。水泥厂废气排放限值如『空气质量控制技术指南』所规定。而废物燃料则受『垃圾与类似物质焚化厂条例』规管，该条例是基于欧盟 2000/76/EC 指令。

德国『联邦排放保护法』要求任何可能对人类、动植物、土壤、水源、大气、气候或景观产生负面影响或相互影响的协同处置项目进行环境适应性测试。在申请执照时，水泥厂应按要求提交与废物燃料使用有关的资料，包括(Bolwerk, 无日期 及 GTZ/Holcim 2006):

- 地形图
- 施工文件
- 工厂正常运营说明
- 使用废物燃料的生产工序的说明与评估
- 能够表明工厂被指定为专门处置残余材料的废物处理厂的证据
- 能够表明工厂适于开展协同处置业务的证据
- 关于待使用的废物所含的每一无机与有机成分以及二次废物燃料最终成分的证明文件
- 排放预防措施说明
- 关于大气污染物(氮氧化物、二氧化硫、二恶英/呋喃、粉尘、重金属)排放的证明文件
- 关于健康与安全标准的证明文件
- 关于节能措施的证明文件

执照申请过程同样对操作要求进行评估，并且需要与下列项目有关的资料(IMPEL Network, 1998):

- 替代燃料的发热值与加入量
- 污染物成分（多氯联苯、重金属等）
- 所使用废物的特性
- 材料的化学特性、物化特性、毒性与生态毒理特性
- 燃烧条件与销毁效率
- 减少环境排放的再循环系统

- 清洗与缓和再循环系统的可行方法
- 操作过程减排（CO 减排）
- 废气清洗工艺的效率与类别

其他相关政府机构和公众能否接触许可证信息，是他们参与和监督工厂表现的重要前提。除了纸质文件之外，还可使用电子报告与数据库。数据库可设计为允许普通大众、当地机关、中央/地方政府、以及其他组织查阅（但权限不同）。欧盟『废弃物焚化指令』要求所有新的许可证申请必须在当地机关作出批复之前，允许公众查看并发表意见(EC, 2011a)。

美国

在 1990 年进行修正之前，美国『清洁空气法』（第 165 节）仅要求新建或改造的固定污染源获得施工许可。然而，1990 年『清洁空气法修正案』新添加了第五章，要求各州针对排放空气污染物的源头实施一项综合许可计划。

美国水泥厂许可证由各州实施『清洁空气法』相关计划的监管机构负责发放。水泥厂通常需获得『清洁空气法』第五章规定的运营许可(EPA, 2008)。许可证发放条件包括：

- 重点空气污染物排放限值，如 NOx、CO、SO、PM 与 HAPs
- 受『硅酸盐水泥制造业有害大气污染物国家排放标准』规管的排放物质，包括 PCDD/PCDFs、PM、Hg、以及总碳氢化合物
-

各州可向排放源收取年度费用，以之作为许可证项目管理所需的“合理支出”。由此产生的收入，将用于局级空气污染物控制计划的推行(McCarthy, 2005)。费用至少应为每吨受控污染物（不含 CO）25 美元(McCarthy, 2005)。有关机构可选择不收取每年 4000 吨排放量以上部分的费用，而收取其他费用项目。

许可证具体指定了空气污染物排放限值。协同处置厂必须制定许可证合规方案，并且证实自身确已合规。许可证有效期最长五年，而后必须进行更新。州级机构向美国环保局提交许可证申请，以供其审核(McCarthy, 2005)。

美国的协同处置水泥厂必须同时获得施工许可，方能使用替代燃料（包括城市固体废弃物与污泥）。这部分是因为对工厂物料处理系统进行必要改造所需的资本支出。协同处置水泥厂通常需按要求进行大气排放性能测试，以证明使用替代燃料/原料不会增加大气排放(U.S. EPA, 2008)。通常会发放短期许可证以开展性能测试。通过性能测试，工厂可以了解替代燃料的技术性能以及使用替代燃料的经济技术可行性。若干美国监管单位的报告指出，那些在进行性能测试后最终未使用替代燃料的工厂，是由于面临技术困难而非与大气排放相关的事项(U.S. EPA, 2008)。在美国，协同处置厂有时需要获得其他的州级许可证，例如固体废弃物工厂许可证。然而，并不是工厂工序的每一次改造或者每次使用新的替代燃料都需要获得许可(U.S. EPA, 2008)。

巴西

截至 2007 年，替代燃料占据了巴西水泥生产所需能源的 23% (美洲开发银行, 2010)。该国在 20 世纪 90 年代早期便首次成功的使用废物衍生燃料。一开始，协同处置并未受到规管，但是州级环保局随后与水泥行业代表企业合作，制定了水泥厂排放标准框架，以及规定工厂需进行燃

烧测试方能获得废物焚化许可证(Marigold, 2007)。到了 1998 年，巴西工业化的南部诸州(米纳斯吉拉斯、圣保罗、里约热内卢、巴拉那、以及南里奥格朗德)生产了该国 65% 的水泥，并且也制定了各自的废物协同处置法规(Maringolo, 2007)。预计巴西总数 65 的水泥厂中，有 80% 已经使用废弃物代替了燃料和/或原料(Busato, 无日期)。

1999 年，巴西联邦环保局发布了国家第 264/99 号管理法“水泥窑——废弃物协同处置活动的许可”。第 264/99 法令规定了水泥窑获得协同处置许可需满足的技术与操作标准、排放限值、以及前置许可测试要求(Maringolo, 2007)。该法令适用于除家庭垃圾、危险废弃物（如放射性、爆炸性、医疗服务、）与有机氯杀虫剂废弃物之外的所有废物。此外，水泥厂必须证明废弃物被用作化石燃料或天然原料的替代物；废弃物的供应稳定而一致；以及经协同处置的熟料不会向环境中泄露危险金属。

第 264/99 规定了获得协同处置许可证的几个步骤；每一步骤都有相应的综合文件要求。最初的处理可行性研究必须包含如下内容：水泥厂一般数据；关于工厂使用的原料与最终燃料特征（发热值、液体粘度、重金属含量、灰渣与水分、以及按照巴西分类标准划分的类别）的数据；所采用的工艺与设备说明，包括流程图；以及一份污染控制设备说明。其后需要准备一份“空白试验计划”，用以检测未进行协同处置的工厂的污染水平，以及标示污染防控技术、检测限值、自检标准、以及预期排放与废物粉尘成分。接下来需要准备一份试燃计划，载明：协同处置过程所有设备、燃料与进料的来源与规格；检测系统；预期排放与产出；以及所有参与测试的技术人员的专业资质。在进行正式测试之前，允许实施一次预试燃以解决相关问题。

目前已针对基本排放与有机危险化合物制定了若干具体排放参数。当地环保机构可基于环境空气质量，制定更加严苛的参数。除此之外，第 316/02 号国家管理法“焚化/协同焚化执照”规定了水泥窑协同处置所产生的二恶英与呋喃排放限值（每立方纳米 0.5 毫微克[ng/Nm³]）。废物燃料的特征必须予以详实记录；而“废物变燃料”的制造商受到其他法律的规管。燃料可能受到比州级法律更为严苛的管理；例如，米纳斯吉拉斯于 2010 年批准的一项水泥窑协同处置废弃物新法规，规定了废弃物的最低发热值（城市固体废弃物为 1500 千卡每公斤）(Kihara, 2012)。2010 年，巴西通过了『国家固体废弃物政策』（12.305/2010 号），该政策旨在统一巴西 26 个州的废弃物政策，同时号召大量减少掩埋法处置。尤须说明的是，该国家政策支持实施基于废物管理体系的地方级废物规划，同时推进城市固体废弃物回收及预处理（第 9 条第 1 段）的发展。该政策将于 5 年后实施。

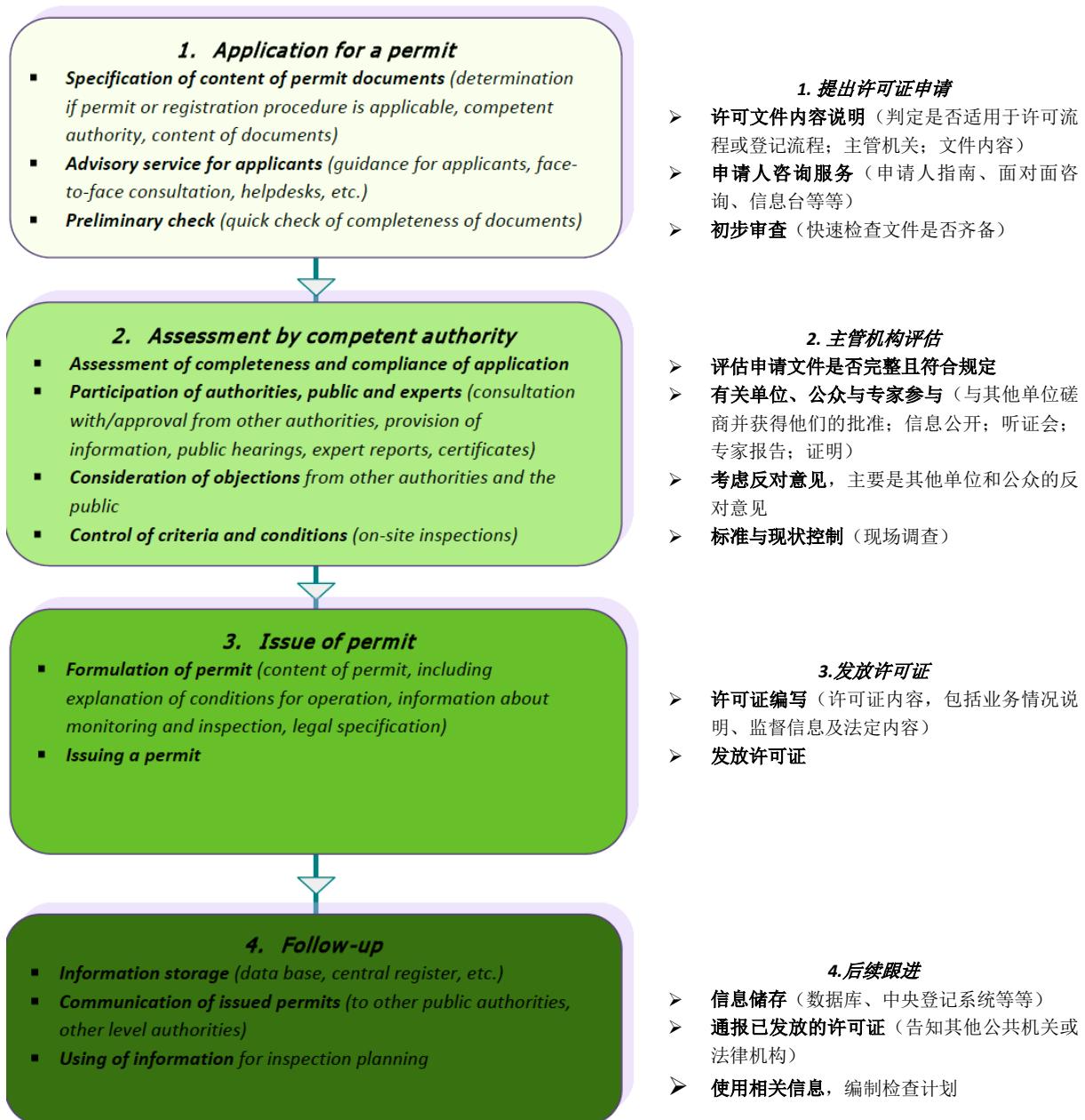


图 13. 巴西协同处置许可证发放的主要步骤 (Milieu, 2011)

3.5. 监测制度要求

协同处置厂最佳监测制度实践包括：标准测量方式、合格器械、人员资质、以及经认可的实验室。协同处置厂的监测包括三大要素：过程监测、排放监测与环境监测(EIPPCB, 2003)。

欧盟

欧盟『废弃物焚化指令』要求协同处置厂安装排放与燃烧的计量和监测系统。大气排放与水排放必须持续或定期进行测量(EC, 2011a)。必须进行持续监测的参数包括：NOx、CO、粉尘量、TOC、HCl、HF、SO₂、燃烧室温度、氧气浓度、气压、以及废弃的温度与水蒸气含量。必须进行定期测量的物质包括：金属与半金属及其化合物、有机物质总量、以及 PCDDs/PCDFs。对于

每小时标准处理能力达 2 吨以上的工厂，经营方必须提交工厂运转与监测的年度报告。年度报告应当公诸于众。当地机关应当公开每小时标准处理能力少于 2 吨的工厂清单(EC, 2011a)。

欧盟境内的工厂必须向欧盟污染物释放与转移登记系统(E-PRTR)提交主要的环境数据(E-PRTR, 2011)。E-PRTR 取代了先前的欧盟污染物排放登记系统(EPER)。EPER 用于接收环境报告，并且包含了水泥行业协同处置厂在内的欧洲 65 个行业大约 24000 个工厂上报的年度数据。每个工厂需提交有关释放到大气、水体和陆地的污染物数量的信息，同时上报废弃物异地转移的数据。E-PRTR 旨在提高环境决策过程的透明度与公众参与度。在德国，这条规定与 PRTR 法一并执行(SchadRegProtAG)。

欧盟法律同样要求协同处置厂提交年度报告阐述各自工厂的运营与监测，包括描述工厂的一般流程、大气排放、水体排放，同时将工厂的排放数据与适用排放标准进行比较。许多欧盟成员国同样要求工厂提交协同处置废物类型以及工厂处理能力的资料。欧盟法律要求成员国每 1 年或每 2 年向欧盟委员会上报一次。欧盟委员会采用标准问卷(EC, 2006a)的形式，供成员国上报各自的废物焚化厂及协同焚化厂（包括协同处置厂）的有关状况。

英国采用经营方污染与风险评估方案，对水泥厂的环境绩效进行评价。2004 年，总计 11 家水泥厂（占英国水泥厂总数 85%）获得了“优秀”等级的经营方绩效，而英国全部行业的平均值仅为 44%。所有的水泥厂必须拥有正式的环境管理制度。英国水泥厂全部通过 ISO 140001 认证，其中 10 家已登记参与欧盟生态管理与审计计划。英格兰和威尔士的全部水泥厂母公司都制定可持续性报告或环境报告。2008 年 1 月，Lafarge Cement UK 成为英国环保局同意之新行为守则下，首家申请废物衍生燃料（取之于塑料、纸张与部分生活垃圾）试点许可的水泥制造商。英国环保局随后于 2008 年 4 月发放了该许可，促进试点工作的顺利进行。在完成了使用固体回收燃料的两次试点工作之后，CEMEX 获得了在其全部英国水泥厂使用该类燃料的许可。每次试点工作中，有超过 10000 吨的废物被用于水泥生产。截至 2008 年，英国水泥行业 26.5% 的化石燃料已被废物衍生材料所替代(MPA Cement, 2009)。为监测因使用污泥而产生的环境释放，西班牙加泰罗尼亚地区的水泥行业于 2005 年与加泰罗尼亚地方当局、工会与地方委员会签订了一份协议，以此启动了水泥厂使用干污泥之环境影响的试点监测工作(CEMBUREAU, 2009)。

美国

针对水泥窑大气排放（即 PM、NOx 与 SO₂），美国环保局的厂区边界监测项目做了相关规定。美国水泥厂的业主或经营方需按要求安装持续式烟气监测系统，同时需按要求提交超额排放的半年度报告。根据延期实施的 CISWI 标准，所有处理非危险固体废弃物的水泥厂必须证明初步满足排放限值。现有工厂必须每年检查洗涤器、袋式除尘器及其他大气污染控制装置。如有必要，亦需进行参数监测与铅检测。对于 Hg、PM 与 HCl，需要安装持续烟气排放监测系统。而 SO₂、NOx、CO、Pb、Cd、PCDDs 与 PCDFs 需要年度测试。至于新建的协同处置水泥厂，其监测要求与现有水泥厂一致，同时还需安装持续烟气排放监测系统对 Hg、PM 与 HCl 实施监测。

美国环保局核查 MACT 与 CISWI 标准、制定排放系数以及确定年度排放量时，需要排放数据与其他合规资料作参考。为减少监管机构与工厂经营方的成本与行政负担，美国环保局可接受电子版的烟囱测试报告。协同处置水泥厂的经营方必须通过电子报告工具(ERT) 提交性能测试

数据。ERT 提供了编撰和储存必要文件的标准化方式，同时大大降低了搜集未来活动（如风险评估）数据的工作强度。ERT 与美国环保局的电子排放数据库(WebFIRE) (EPA, 2012c)相连。WebFIRE 用于储存制定排放系数时使用的排放测试数据。因此，水泥厂经营方可以使用 ERT 搜集和准备数据资料，同时还可通过美国环保局的中央数据交换网络提交数据存储于 WebFIRE 数据库。

3.6. 法规执行

执行法规与标准，是打造成功、环保而安全的协同处置行业的关键。法规与标准的执行，同样能够确保协同处置业的资金与市场。

欧盟

在欧盟，成员国必须每 1 年或每 2 年向欧盟委员会报告有关废物管理体系目标的完成情况。报告通常是在报告周期结束后 18 个月提交。而后，欧盟委员会必须向欧盟议会和欧盟理事会报告『废弃物焚化指令』的执行情况。违反欧盟『综合污染防控指令』的工厂将面临行政处罚。

美国

美国『清洁空气法』第 113 节规定联邦机构可颁布命令和庭谕，要求有关单位遵守『清洁空气法』和对违法行为进行处罚。第 114 节授权美国环保局要求排放源监测烟气排放、证明自身合规、以及提交报告，同时授权美国环保局工作人员进行视察。地方或州级政府主要负责『清洁空气法』的实施，以及发放许可证、合规监测以及进行大部分的视察活动。

2008 到 2010 年间，美国环保局制定了水泥行业的国家级“新污染源审核/防治重大恶化”(NSR/PSD)执行措施。该措施随后以“减少最大污染源空气污染物排放”形式于 2011 到 2013 年间继续实施(U.S. EPA, 2011g)。美国环保局执行与合规保证办公室促进了合规建设，同时联合环保局地方办事处、各州政府及其他联邦机关实施各项环境法规。2010 财年度，美国环保局启动了针对 85% 美国水泥厂的调查与协商(U.S. EPA, 2011h)。执行与合规保证办公室采取的主要执行策略是合规调查与评估。合规调查的主要形式包括(U.S. EPA, 2009):

- 书面资料索取
- 州级/地方许可资料审核
- 地区资料审核
- 公共信息审核
- 现场合规调查
- 污染源排放测试信息索取
- 违规通知
- 行政命令、行政处罚命令、或将案件转移给司法部
- 支持被转移的索求
- 记录案件进展
- 通过培训提高地方人员对于调查技巧的认识

违反『清洁空气法』的行为可能受到轻罪或重罪指控。因违反排放要求而需缴纳的罚金最高可到 27,500 美元/每天(U.S. EPA, 2010)。美国环保局有权对行政处罚措施展开评估，同时可授予提供定罪信息的人员高达 10000 美元的奖励。根据 2011CISWI 标准（生效日期已延迟），新建的

处理非危险固体废弃物的水泥厂必须在水泥窑达到运营收费标准之后 60 天内或不迟于水泥窑初步启用后 180 天，证明自身符合排放限值之规定。现有水泥厂必须“尽可能快”地证明自身符合排放限值规定，并且最迟不得超过州级方案批准后 3 年或 2011CISWI 标准颁布后 5 年。各州负责制定实施美国环保局法规的程序与措施。各州执行方案必须包括针对新建和现有水泥厂的排放限值与其他规定，同时必须提交予美国环保局审查。

4. 协同处置的技术层面——国际最佳实践

协同处置需要一系列的技术成分，包含废弃物的预处理以确保废物适于在水泥窑内焚烧。为实现协同处置，必须对水泥厂进行一系列的改进，同时需要新的设施和技术用于城市固体废弃物与污泥的贮存、传送、配料、喂料与最终处理以及对烟气排放进行测量和控制(ALF-CEMIND 2012)。

以下各分节介绍了城市固体废弃物与水泥在预处理与协同处置不同阶段中所采用的技术。本报告不介绍协同处置“操作层面”的细节。欲了解操作层面更多的信息，请参考 GTZ/Holcim (2006)、WBCSD (2005)与 EIPPCB (2006)。

4.1. 预处理技术与实践

用于水泥行业协同处置的废弃材料的来源都经过了挑选。如前文所述，废弃物通常都需要预处理（如干燥、脱水、破碎、混合、粉磨或均化）和质量保证(CEMBUREAU 2009)。混杂的城市废弃物必须在废物管理厂进行预处理。预处理程度取决于垃圾的来源和类别以及水泥行业要求(EIPPCB 2010)。

4.1.1. 城市固体废弃物的预处理技术与实践

城市固体废弃物混杂着各类材料。预处理有助于制造更为均匀的燃料 (RDF)，因此必须作为城市固体废弃物管理制度的一部分。图 14 列举了城市固体废弃物综合管理示例(GTZ/Holcim 2010)。RDF 作为燃料的主要特征包括发热值、水分、灰分、以及含硫/氯量。这些数值取决于废弃物的成分，而废弃物成分又随着来源地的不同以及源头（例如家庭、办公室、建筑公司）、季节、收集制度（混合城市固体废弃物或垃圾分类）与预处理技术（筛分、分选、粉磨、干燥）的变化而改变(ALF-CEMIND 2012)。

城市固体废弃物的预处理方式多种多样。发达国家普遍对用于水泥行业的城市固体废弃物实行机械生物处理(ALF-CEMIND 2012)。下文将详细介绍机械生物处理技术。

机械生物处理

机械生物处理是综合了其他废物管理技术若干普遍工艺之后的通称(Defra 2007)。机械生物处理的主要目的是从城市固体废弃物中获得可燃材料 (RDF)。在这个过程之中，未经处理的城市固体废弃物经过筛分以回收可循环利用的松散材料，例如金属、塑料、相当尺寸的硬纸板、铝罐及其他可供再利用的材料。余下的材料主要是诸如塑料和可生物降解垃圾等有机化合物，在破碎成理想尺寸制造成水泥厂使用的废物衍生燃料(图 15) (ALF-CEMIND 2012)。



图 14. 城市固体废弃物综合管理示例(GTZ/Holcim 2010)

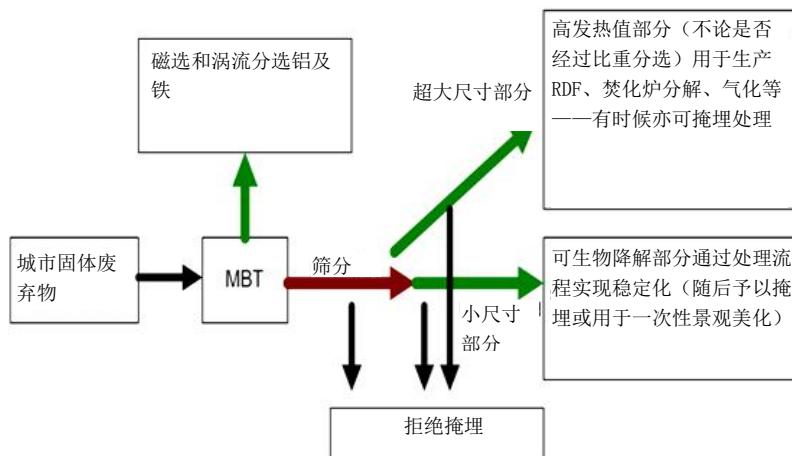


图 15. 机械生物处理技术制造废物衍生材料示例(ALF-CEMIND 2012)

平均说来，每通过机械生物法处理 1 吨的城市固体废弃物即产生大约 250 千克的废物衍生燃料。这一数值在部分国家分别为：奥地利 230kg（MBT）、比利时 400-500kg（MBT）、荷兰 350kg（机械处理）以及英国 220-500kg（机械处理）(ALF-CEMIND 2012)。

图16展示了机械生物处理的主要流程。右侧的简化版干化稳定技术可作为新兴国家引入机械生物处理机械的一个选项，这是因为新兴国家的城市固体废弃物中含有大量的有机物质(Seemann 2007)。

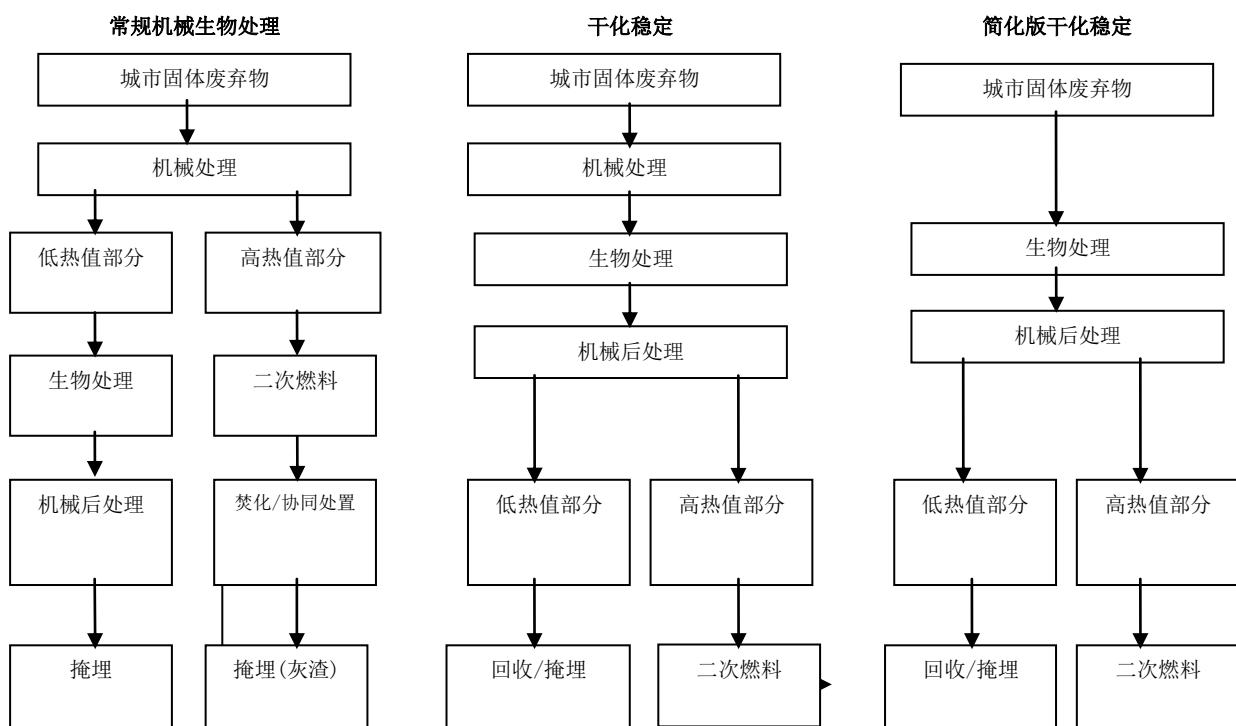


图 16. 机械生物处理主要步骤流程图(Seemann 2007)

机械生物法被广泛运用于处理非危险废物，例如城市固体废弃物、商业垃圾、建筑垃圾与拆迁垃圾。最常采用这一方式处理的废弃材料包括纸张、塑料、木材及纺织品。机械生物法制造的两个主要燃料类别为：破碎或绒毛状材料以及固体成型燃料，例如颗粒状、立方体与坯块状。固体成型回收燃料的净发热值视成分不同，最高可达 30 MJ/kg。据有关报告指出，最低发热值从 3 MJ/kg 到 40 MJ/kg 不等(EIPPCB 2006)。

废物衍生燃料生产线上各处理装置

组成废物衍生燃料生产线的若干处理装置能够分离出多余成分，以及调整可燃物质以取得必要的燃料特征。通常处理装置分离废弃物，减小废物粒度并且实现废物的干化与固化成型。此类装置的排序可根据城市固体废弃物的成分以及废物衍生燃料必须达到的质量进行调整。下文简要介绍了废物衍生燃料的各类处理装置(Nithikul 2007)。

废物分选

废物分选装置挑出适合不同最终用途的各类材料。最终用途可包括回收利用、生物处理、RDF 能源回收以及垃圾掩埋。废物分选技术多种多样（参见表 11），大部分的废物处理厂同时组合使用若干类技术。废物分选技术利用了废弃物材料的不同属性（尺寸、形状等）。下文将简要介绍部分同样的废物分选技术。表 13 基于意大利地区的一项研究，介绍了此类分选技术通常的电力需求、资金投入以及运营成本(Caputo 与 Pelagagge 2002)。

表 11. 城市固体废弃物分选技术(Defra 2007)

分选技术	分选属性	目标材料
人工分选	可识别特征	塑料、杂物、大尺寸
滚筒筛分	尺寸	大 – 纸张、塑料 小 – 有机物、玻璃、细料
磁选	磁性	黑色金属
涡电流分选	导电性	有色金属
湿法分选技术	比重	浮 – 塑料、有机物 沉 – 石头、玻璃
风选	重量	轻 – 塑料、纸张 重 – 石头、玻璃
弹道式分选	密度与弹性	轻 – 塑料、纸张 重 – 石头、玻璃
光选	衍射	特定塑料聚合物

人工分选。 处理城市固体废弃物的第一步通常是人工分选。体积庞大的物件（例如电器、家具等）以及某些杂物（如危险废弃物），通常由工人手工分拣。人工分选同样适用于回收纸张、塑料/玻璃容器、以及铝罐头。人工分选所使用的设备通常包括输送带和工作台(Nithikul 2007)。

滚筒筛。 滚筒是一个向下倾斜的可旋转圆柱型筛子（如图17所示）。筛面通常为金属丝网或多孔板。滚筒筛可用于减量(前滚筒处理)或破碎后(后滚筒处理)分选混合城市固体废弃物。事实证明，滚筒筛能够高效地处置混合城市固体废弃物，且目前被广泛采用(Nithikul 2007)。



图 17. 滚筒筛(Doppstadt US 2012)

磁选。 磁选主要用于分选出城市固体废弃物中所含的黑色金属。磁选机的三大组成部分分别是：永磁滚筒、磁鼓、以及磁选带。城市固体废弃物中每单位磁性金属重量的单段磁选回收率大约为80%。而采用多段磁选的回收率更高。倘若在磁选机之前使用风选机（见下文），那么回收率可提高到85%到90%之间。这是因为风选机可以吹走纸张、塑料等重量轻且干扰磁选工序的杂物(Nithikul 2007)。

风选。风选主要利用了废弃物各不相同的空气动力特性。这一工序是气流、破碎废物以及重力的相互作用。漂浮在气流中的城市固体废弃物被称为轻质成分（如纸张和塑料），而固定不动的部分则为重质成分（如金属和玻璃）。不同气流流态的风选机类型各不相同(Nithikul 2007)。

圆盘筛。圆盘筛通常被用于分离城市固体废弃物的无机成分。圆盘筛由均匀固定于横轴的一排圆盘构成。圆盘之间的空隙允许小尺寸颗粒通过。全部轴的旋转方向一致，将废物从一端送至另一端(Nithikul 2007)。

废物减量

减量（有时称为破碎或粉磨）是城市固体废弃物机械预处理阶段的关键步骤，因为它决定着废物尺寸的均匀度。许多废物处理厂通常将混合废物破碎至10厘米大小。倘若要获得尺寸小于10厘米的废物衍生燃料，还需额外的破碎工序(Defra 2007)。

表12介绍了适用于城市固体废弃物的各种减量技术和工作。其中有两种是城市固体废弃物管理的重要工具：高速低扭矩锤式破碎机以及低速高扭矩破碎机。它们的原理、优势与弱点各不相同(Fitzgerald与Themelis 2009)。下文将简要介绍锤式破碎机和破碎机。表13基于意大利地区的一项研究，介绍了此类分选技术通常的电力需求、资金投入以及运营成本(Caputo与Pelagagge 2002)。

燃料消耗是使用减量设备的另一重要经济考量。废物需要达到的最终尺寸，影响着减量设备的能源强度。废物最终尺寸越小，处理过程所需能源越多。图 18 展示了减量设备的能源消耗量随着废物最终尺寸的缩减而不断提高。

锤式破碎机。 锤式破碎机可分为两个类型：卧轴与垂轴。卧轴锤式破碎机通常运用于混合城市固体废弃物。卧轴锤式破碎机由轴、锤头、篦条、刀片及铰链式废品排除斜道组成（参见图19）。废物从机器开口处进料，经锤击和一系列机械处理后，缩减到适合通过炉篦的尺寸（Nithikul 2007）。有多种尺寸和处理能力的锤式破碎机可供选择。部分机器每小时可处理最多300吨的城市固体废弃物。处理能力取决于废物最终尺寸以及待处理废物的成分。较大型锤式破碎机持续运转的实际处理能力峰值约为150吨/小时。锤式破碎机每处理一顿废物的能源消耗量从6千瓦时到22千瓦时不等(Fitzgerald与Themelis 2009)。

表 12. 城市固体废弃物减量技术(Defra 2007)

工具	技术	主要忧虑
锤式破碎机	悬摆式钢锤能够显著地减小材料尺寸。	钢锤磨损、玻璃/聚合物粉化及“损耗”
破碎机	大扭矩转刀或转钩低速旋转。剪切作用能够撕毁会切碎大部分材料。	大型坚硬物体可对破碎机造成损坏。
转鼓	材料被提升到转鼓边缘，而后被扔进中心位置。在重力的作用下，废弃物被翻搅、混合与均化。玻璃、金属等密度大的摩擦性物质有助于分解比较软的材料，从而客观地减小纸张及其他可生物降解材料的尺寸。	原料水分含量高是个问题。
球磨机	转鼓使用重球以粉碎或粉磨废物。	钢锤磨损、玻璃/聚合物粉化及“损耗”
湿法刮刀式转鼓	废物浸湿后形成重块，随后被倾倒入转鼓内由刮刀进行粉碎。	减量程度相对较低，且可能因大容器而造成损坏
裁袋机	这款温和的破碎机被用于塑料袋裁割，同时确保大部分废物完好无损。	无减量；大型坚硬物体可对裁袋机造成损坏

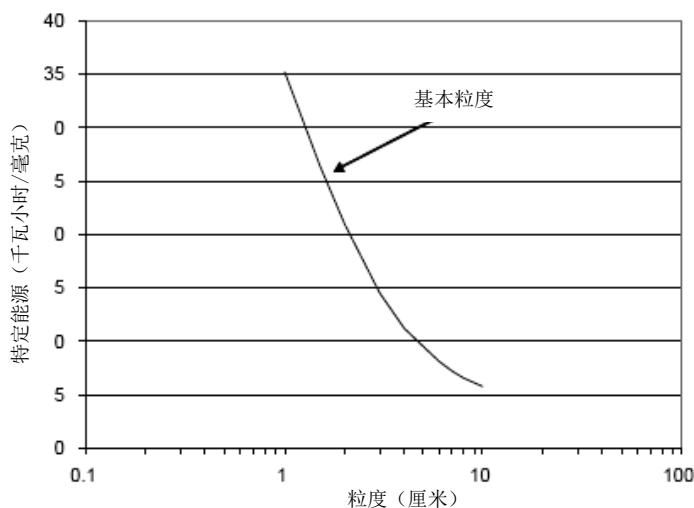


图 18. 城市固体废弃物减量的具体燃料需求(Nithikul 2007)

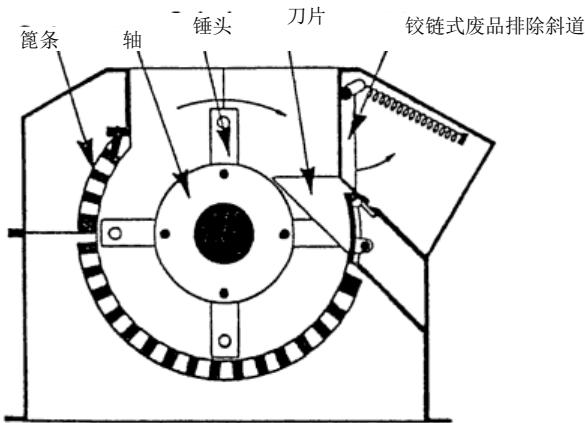


图 19. 卧轴锤式破碎机草图(Bilitewski 等人. 1997)

破碎机。破碎机为高扭矩低速运行（每分钟转10到50圈[rpm]）。破碎机依赖于切削力与撕扯力，且几无或没有撞击力。破碎机通常为单轴、双轴或四轴配置。轴的数量越多，最终粒度越小（参见图20）。反转轴之间配有相互啮合的铡刀，其对任何通过铡刀的材料都受到巨大的撕扯力。破碎机的处理能力取决于马达转速以及铡刀之间的容量大小。目前可用的工业破碎机最大处理能力可达70吨每小时。破碎机的能源消耗量从3千瓦时到11千瓦时不等(Fitzgerald与Themelis 2009)。由于具有较大的扭矩的撕扯力，破碎机通常被用于处理轮胎、铝材、塑料等难以切碎的材料(Nithikul 2007)。

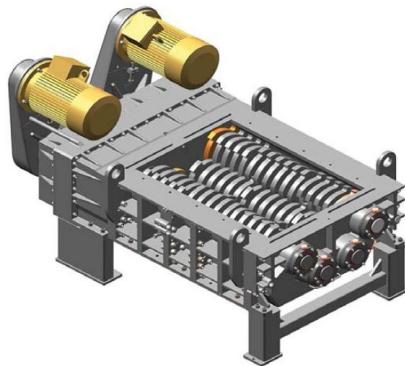


图 20. 城市固体废弃物破碎机草图(Fitzgerald 与 Themelis 2009)

干化与成型

干化与成型是RDF的生产步骤，同时是掩埋前减小废物体积的方式。这一工序的目的是改善RDF品质。废物经固体成型，能够产生坯块状、颗粒状和立体状(Nithikul 2007)。根据废弃物的水分及物理特征，在干化之前还可施加一道脱水工序。脱水技术包括：重力浓缩、离心浓缩、气浮浓缩、重力输送带及转鼓浓缩。

干化废物会用到不同类型的技术。废物干化技术分为大体如下几大类型(Schu 2008):

- 生物干燥稳定处理（未经处理的城市固体废弃物——经破碎后< 200毫米）
- 热干化
 - 鼓式干燥机（处理后的城市固体废弃物——经筛分/破碎< 60 mm）

- 带式干燥机（处理后的城市固体废弃物——经筛分/破碎 $< 40\text{ mm}$ ）
- 隧道式干燥机（城市固体废弃物——经筛分 40-400mm）（图21）

生物干化使用垃圾混合物的内热，以及热交换器提供的机械通风与能源循环。干化工序的能源主要来自于废物有机物质氧化物的微生物过程。这类方法的弊处是排放气流体积大，以及干燥周期长达7至10天。同样的，部分发热值高的城市物体废弃物中所含的能用于该方法的生物源物质不足。因此，废物热干化通常比生物干化更受欢迎 (Schu 2008)。

热干化使用对流干燥机或传导干燥机。使用对流（直接或隔热）干燥机时，加热媒介（如热气）与待干燥产品之间直接接触，从而带走废物所含的水分。使用传导干燥机时，加热媒介与产品之间无直接接触。热转移发生于废物与加热面的之间的接触点，而水分则由运载气体或空气带走。传导干燥机所需的气体仅为对流干燥机的10%。因此，由于废弃排放量更低，传导干燥机比对流干燥机更适合用于粉状或臭味废弃物 (EIPPCB 2006)。

表13基于意大利地区的一项研究，介绍了此类分选技术通常的电力需求、资金投入以及运营成本（该研究所使用的干燥机类型不明）(Caputo与Pelagagge 2002)。

1.1.1.1 生产成本

RDF生产成本取决于生产线上减量、固化成型与干化设备的配置。而设备的配置部分由预期RDF品质所决定。Caputo与Pelagagge (2001)指出，RDF生产线配置差异，影响着最终每吨RDF的成本(Caputo 与 Pelagagge 2002)。表13介绍了意大利不同RDF生产单位的预估成本。基于Caputo与Pelagagge(2001)的预测，附录4则介绍了意大利不同RDF生产线配置的性能与总成本。

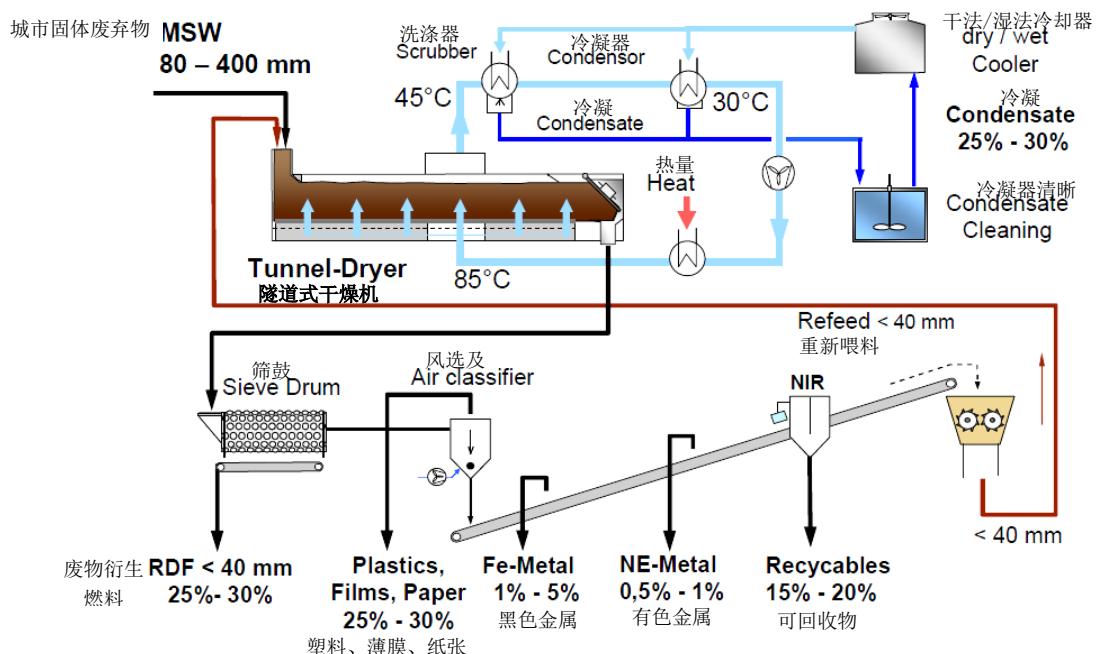


图 21. 低温隧道式干燥机工序流程图(Schu 2008)

表 13. RDF 生产线设备成本(Caputo 与 Pelagagge 2002)

设备	处理能力 (t/h)	功率 (kW)	成本(千欧元)	摊销 (Euro/h)	运营成本 (Euro/h)
增稠器	6	5	206.58	4.73	3.62
风选及	5	12	41.31	0.95	0.87
干燥机	6	140	309.87	7.09	10.12
带式输送机		6	15.49	0.35	0.43
锤式破碎机	2	200	129.11	2.96	14.46
	4	250	144.60	3.31	18.08
	6	300	154.93	3.55	21.69
造粒机	4	50	206.58	4.73	3.62
涡流分选机	5	2.2	7.23	0.83	0.27
分离器	10	2.2	11.87	0.96	0.45
	15	2.2	14.97	1.14	0.48
磁选机	5	3.75	36.15	0.17	0.16
	10	6.25	41.53	0.27	0.16
	15	6.6	49.57	0.34	0.16
人工分选				0.00	23.65
破碎机	6	25	56.81	1.30	1.81
	10	50	108.45	2.48	3.62
	15	50	129.11	2.96	3.62
	25	55	154.93	3.55	3.98
滚筒筛	15	20	103.29	2.36	1.45
	25	30	154.93	3.55	2.17

注：摊销费用根据 10 年使用周期、每周 6 天运营时间、以及每天 2 趟 7 小时班次进行预估。电力成本以每千瓦时 0.0723 欧元计。且假设每班次需要两名操作工进行人工分选(Caputo 与 Pelagagge, 2002)。

4.1.2. 污泥预处理技术与实践

如图22所示，污泥在预处理之前需要经过一道机械脱水工序(ALF-CEMIND 2012)。经过脱水工序处理之后，干固体含量从2%-5%上升到20%-40%，具体取决于未经处理污泥的特性以及所使用的脱水方法。附录5介绍了澳大利亚某项目的污泥预处理与协同处置完整流程图(EIPPCB 2006)。

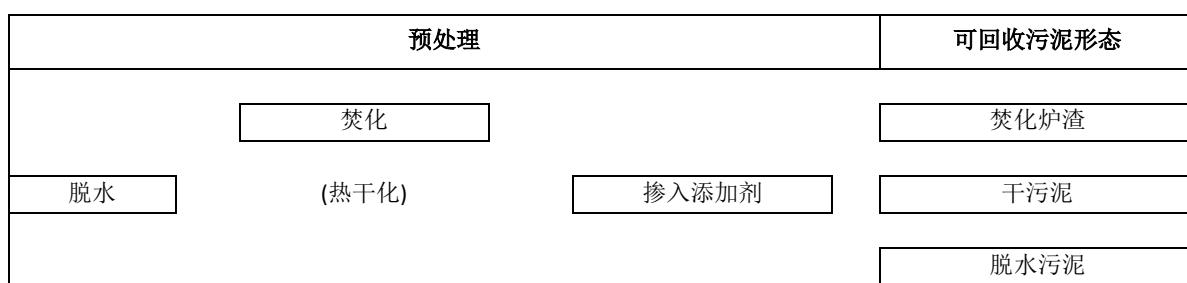


图 22. 污泥预处理草图(Taruya 等人. 2002)

污泥脱水

污泥脱水能够提高污泥的干固体含量，从而产生干固体含量达20%-50%的污泥饼以及一系列含水废物。含水废物所需的额外杂质去除工序越少，污泥脱水的费用便越低。为通过脱水获得含

量超过10%的干固体，有必要使用高分子凝絮剂等化学调理物质协助去除污泥所含的结合水或附连水(EIPPCB 2006)。

脱水工序分为若干不同类型。选择何种类型的脱水工序，取决于产出固体以及所需污泥饼的属性与频率。例如，压滤机（或板框式压滤机）采取批处理的方式需要大量的人力。压滤机能够生产干固体含量达40%的污泥饼。其他类型的拖回技术采用了带式压滤机，主要由一快滤布持续地在滚筒穿梭，从而强制脱除污泥所含的水分。带式压滤机能够生产干固体含量达40%的污泥饼。压滤机最常用于处理废物处理厂的污泥(EIPPCB 2006)。机械脱水过程需要大约3-5千瓦时的电力，方能将污泥的干固体含量从5%提高到35%。为实现这类水平的干余量，通常会添加有机凝结剂或其他沉淀剂(Reimann, 1999)。据报道，中国污泥脱水成本（增加的干固体含量从3%-20%）约为每立方米浓缩污泥8至12元(IWA Water Wiki 2011)。

实际上，脱水污泥通常含70%到80%的水分。高水分含量可导致水泥窑内污泥的负面吸热。在某些案例中，使用水分如此高的“燃料”可导致窑炉温度低于生产水泥熟料所需的最低温度，从而对产成品质量造成负面影响。同理，水份蒸发量过高将增加气态废物流速，从而导致气态废物清洗装置过载或超出鼓风机运转能力(Stasta等人. 2006)。这将降低熟料产量，并最终失去在当地市场销售水泥的机会。除此之外，由于脱水污泥体积大以及运载污泥的卡车需承担污水和臭味的风险，因此脱水污泥的运输成本相对较高。计划在窑炉内使用脱水污泥时，就务必设法减轻此类风险(Taruya等人. 2002)。

Taruya等人(2002)在报告中指出，2001年日本水泥行业使用的污泥总量中（脱水污泥约100万吨），脱水污泥占据了超过半壁江山。然而，Taruya等人并未提及日本脱水污泥的平均干固体含量。同理，在世界上大部分地方，脱水污泥经进一步处理以提高干固体含量，而后再用于协同处置水泥厂。

污泥干化

如上文所述，脱水污泥协同处置与焚化具备技术可行性但并不划算，因此脱水污泥通常经干化以降低水分并提高其热含量(Onaka 2000)。阳光曝晒或室外干化是降低脱水污泥所含水分的方法，且在污泥稀薄摊开以及拥有巨大场地时，效率极佳。其他更为有效率的干化技术使用了如下各类型干燥机（Flaga, 无日期）：

1. 对流干燥机，污泥在其内与干化媒介（如热气）直接接触。能够用于污泥干化的对流（直接式）干燥机包括风力干燥机（气流干燥机）、旋式或鼓式干燥机、以及流化床干燥机。
2. 接触式干燥机，污泥在其内仅与加热媒介的受热面接触。能够用于污泥干化的接触式（间接式）干燥机包括浆式干燥机、圆盘干燥机、多层次架式干燥机、以及螺旋干燥机。
3. 混合对流—接触式干燥机
4. 红外干燥机，使用红外放射线或高频电流。

某些技术仅能部分干化污泥（干固体含量不超过85%或90%），但并不是每次都需要将污泥干化至超过90%的干固体含量（Flaga, 无日期）。Hall（1999）预计污泥干化费用在每吨干固体330到880美元之间。下面将介绍若干使用不同热源干化污泥的方法。

鼓式干燥机

采用管鼓干燥时，脱水污泥通过链式输送机逐次添加到回转式管鼓。脱水污泥在干燥机内的停留时间，以及相应的粒状污泥干燥度，均可通过液压调整管的角度得以实现。干化工序使用的能源来自于关联水泥工序或焚化炉的废热。

高达30000立方米每小时的干化空气（最高100100 °C）以与脱水污泥相反的方向流经回转管。空气的热量被用于污泥水分蒸发，烟气则被滤尘器吸收并直接传递至生物过滤器。粒状干污泥随着鼓的旋转自动排出，而后被装到大袋子或其他容器之中(EIPPCB 2006)。

干化过程尤其应当避免污泥碳化，这是因为汞排放量在碳化温度（160 °C）下达到最高值。然而，同样应当注意的是，即使干化工序是在更高的加热媒介温度下进行，粒状污泥自身的温度始终低于120 °C且不释放出汞。由于这个物理特性，污泥干燥机不会出现汞排放。因此，污泥干燥机的排放控制许可通常无需测量汞的数值。此后，当污泥在水泥窑内协同处置时，由于石灰浓度高，因此阻止了汞的快速释放(Zabaniotou与Theofilou 2008)。

使用水泥厂烟气废热以干化污泥

另一污泥干化方式是采用水泥厂烟气废热。Stasta等人（2006）曾经对利用水泥厂多余热量干化污泥的可行性与经济性进行了分析，发现影响此类项目的经济性的部分主要因素包括：污泥处置的利润、运输成本、经处理的干燥物质数量、以及污泥的干燥物质成分（Stasta等人. 2006）。通过计算，他们得出了每干化一吨湿污泥需要10.8GJ热量的结论。他们在报告中指出，使用对向流轴式交换机时，水泥厂烟气能够提供污泥干化所需的这一热量。Stasta等人考虑利用旋转式圆盘干燥机技术干化污泥，这一技术大约需要264万美元的整体项目投资成本，且需要大约5年的时间才能实现成本回收（Stasta等人. 2006）。另一澳大利亚的案例研究评估了卧式流化床干燥机的使用。这类干燥机预估资本投入约为240万到340万美元，每年的污泥干化量为60000吨(APP 2011)。其他有关使用水泥厂废热干化污泥的案例研究由德国、土耳其和中国进行。图23以图解法介绍了水泥厂烟气废热用于污泥干化的过程。

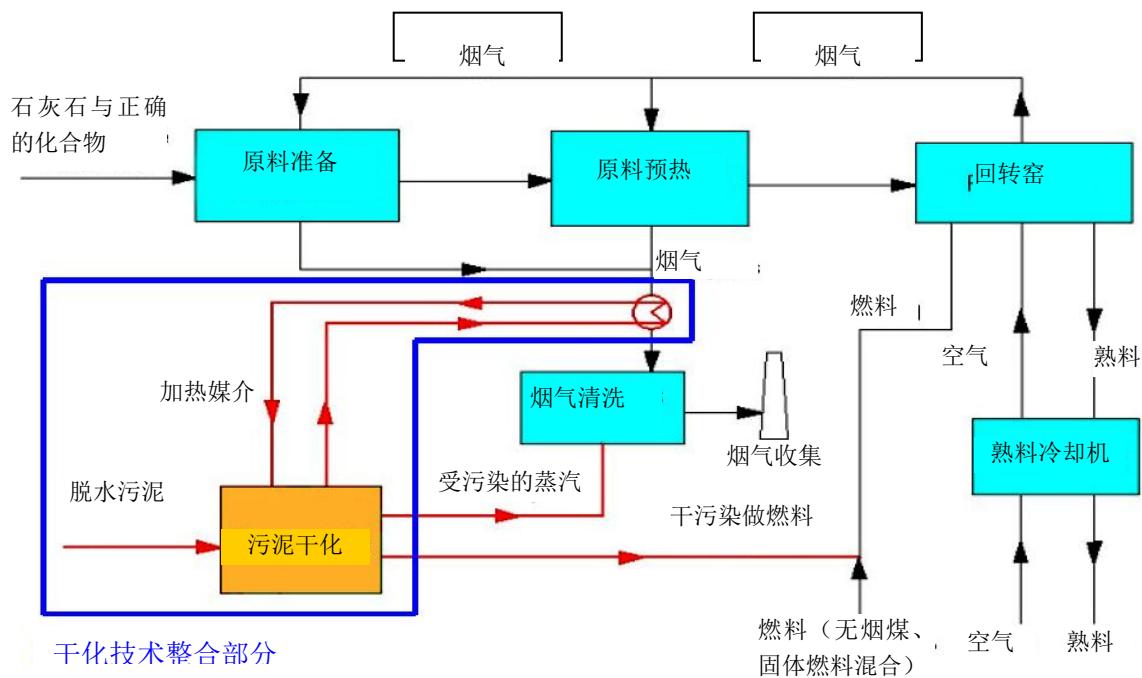


图 23. 使用水泥厂烟气废热干化污泥(Stehlík 等人, 无日期)

厌氧污泥分解所得的生物气体用于热干化

厌氧分解是微生物组织在没有氧气参与的情况下分解可生物降解材料的一系列过程。厌氧分解被用于废物管理及/或释放工业/家庭用途所需的能源。污泥处理的厌氧分解过程的主要过程是减量、生物气体生成、以及提高已处理污泥的脱水特性。图24介绍了污泥被厌氧分解的过程(Hanjie 2010)。污泥厌氧分解所产生的生物气体可在水泥厂废热不足的情况下，用于热干化脱水污泥。这能够避免热干化过程使用常规燃料。初始污泥⁷厌氧分解所产生的气体量约为每千克挥发性固体362到612升，而活性污泥这一数值为每千克挥发性固体275到380升(Hanjie 2010)⁸。

⁷初次污泥又称原污泥，是来自于初次澄清池底部。初次污泥可轻松实现生物降解。

⁸活性污泥又称剩余污泥或废物活性污泥，产生于二次处理之后。活性污泥比初次污泥更难以分解。

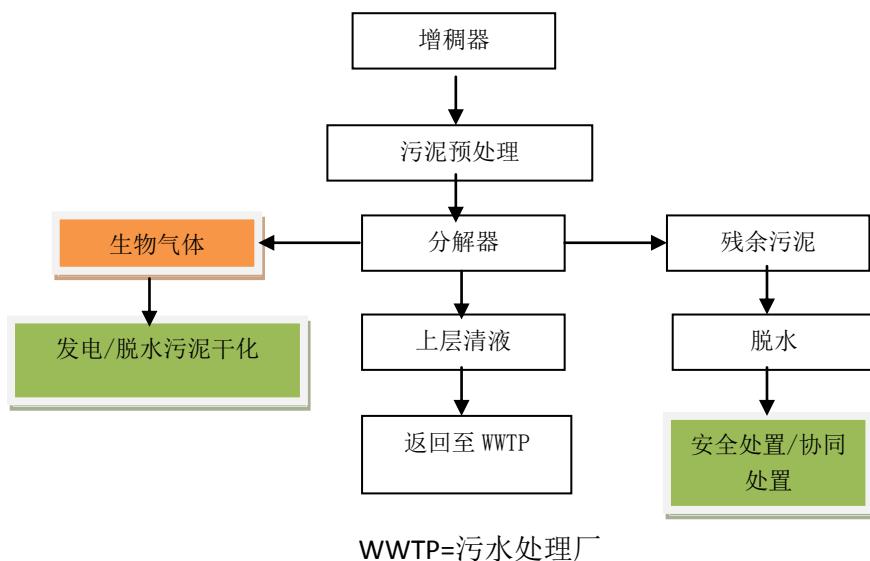


图 24. 包含厌氧分解的污泥处理步骤(Hanjie 2010)

表14介绍了位于土耳其和中国的Heidelberg水泥厂采用不同方式干化一吨污泥所产生的CO₂排放量。三种污泥干化法分别为：100%使用天然气、天然气与污泥分解气体各占一半、以及100%利用水泥厂废热干化污泥(Theulen 2011)。图14显示了，从减少CO₂排放量的角度出发，污泥协同处置比污泥焚化更受欢迎，且仅适用水泥窑废热干化污泥时能获得最大程度的CO₂减排。

表 14. 水泥厂或焚化炉使用不同方式干化一吨污泥所产生的 CO₂ 排放量(Theulen 2011)

污泥干化法	热量来源	每吨干污泥的 CO ₂ 排放量（以 CO ₂ 等价量计算）	
		水泥协同处置	焚化
100% 天然气	天然气	-400 kg	
50%天然气, 50% 污泥分解气体	污泥分解	-750 kg	+600 kg
100% 废热	水泥窑	-1,100 kg	

生石灰与脱水污泥混合的干化方式

日本奈良市使用着另外一种污泥干化技术，即通过将生石灰与脱水污泥混合以产生可用于水泥生产的原材料。这一过程利用如下水和作用方程式所产生的热量实现污泥干化：



由此获得的产品，即粉状干污泥，具有非常低的水分含量、无气味、且能够作为水泥行业的替代燃料与原材料。图25介绍了这一干燥过程。分解与混合机所产生的废弃含有2,400 mg/l的粉尘与氨气。废弃经袋式过滤器、化学洗涤、以及活性炭吸附处理。通过这一过程，水分含量达80%的脱水污泥可被转化成水分含量仅为5%的干污泥。干污泥包含了平均粒径为100到200微米(μm)颗粒物，且可以储存超过10天的时间(Taruya等人. 2002)。

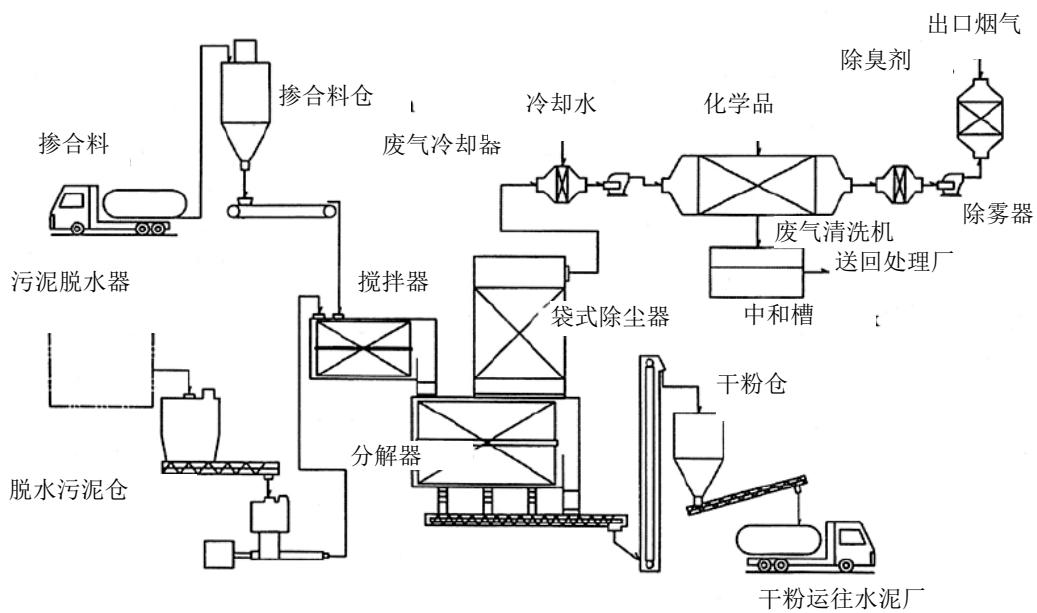


图 25. 日本奈良市粉状污泥生产流程

污泥日光干化

使用这一类型的干燥机主要是依赖太阳光线加热污泥的表面。温度的上升将迫使水分子拍到周围空气中。而输送水分子的湿空气必须排空。然而，虽然污泥表层变干燥，但是底层仍然潮湿，因此需要进行干化或翻面儿。部分系统通过一个翻转和传动机器实现污泥翻面儿，确保底层也能受到光照。而在其他系统中，污泥在一个使用太阳能热量的温室中实现干化，而污泥的底层则通过一个使用其他来源废热的地面加热系统实现干化。Anlagenbau GmbH是太阳能污泥干化的技术供应商之一。目前世界上有超过100套的太阳能干化系统，且大部分应用于农村地区的小社区。

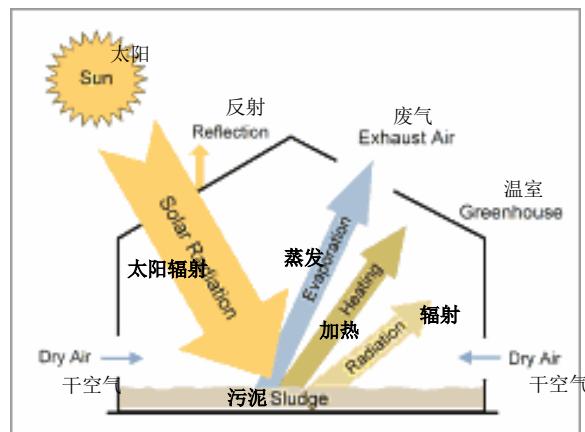


图 26. 带自然通风功能的室外干化床太阳能污泥干燥机草图(Anlagenbau GmbH 2012)

干污泥粉磨

在某些案例中，在将干污泥添加到水泥窑的主燃室之前确实有必要进行粉磨。这尤其是在主燃室内替代燃料的粗糙度比较高的时候，因为污泥的细微度是保证火焰具有足够烈度的重要因

数。以荷兰Maastricht水泥窑为例，工厂获得良好的火焰性能，决定将污泥粉磨至15%到25%的污泥粒径仅有90微米为止(Takx 2002)。为达成这一目的，有多种粉磨系统可供选择。

2000年2月，荷兰ENCI水泥厂联合Claudius Peters公司，安装了一套名为“BioMill”的垂式滚筒粉磨机，用于干污泥的粉磨。该粉磨机使用大气，且包含了五颗在直径不超过2米的粉磨台上旋转着的大型研磨球。该机器的能源消耗量约为40千瓦时每吨(ALF-CEMIND 2012)。该系统配有静电除尘器，且可以通过人工控制调节产成品的细微度。经粉磨后的污泥存放配有压力释放阀及滤尘器的竖仓。袋式过滤器配有三个防爆阀。粉磨后的污泥被运送到位于燃烧室底部的筒仓(100 m³)。该筒仓配有一个压力释放阀以及一个过滤器。污泥随后由配料系统喂入水泥窑(Takx 2002)（图27）。在另一个澳大利亚的研究案例中，垂式滚筒粉磨机被用于在水泥窑协同处置之前的干污泥粉磨。预计每年粉磨60000吨干污泥的资本投入约为330万到480万美元(APP 2011)。

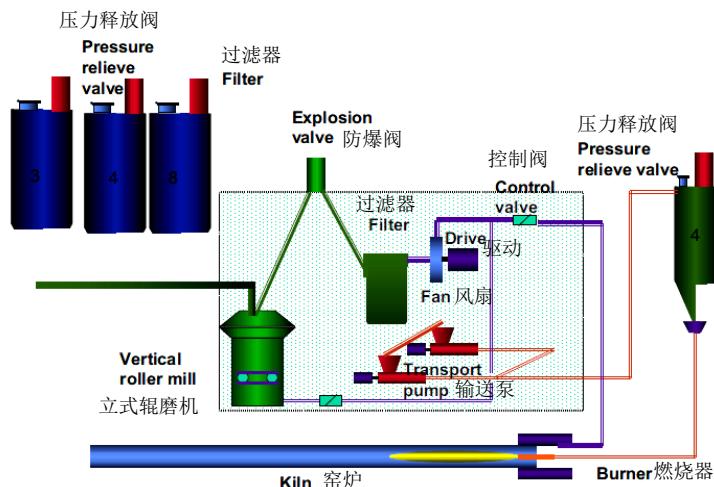


图 27. 干污泥粉磨系统 (BioMill) (Takx 2002)

污泥预处理的成本

污泥预处理工序所使用的处理设备包括机械筛、重力增稠器、机械增稠器、沉降式离心机、厌氧分解器以及污泥干燥机。在实际应用中，可能需要同时用到三种设备(Gorgun与Insel 2007)。Gorgun与Insel (2007) 评估了土耳其若干个由多种污泥处理设备组成的替代工序。表15介绍了此类替代工序的投资成本、年度运营成本、以及回款周期。Steiner等人 (2002)同样讨论了污泥管理的经济层面，并给出了不同发展中国家的污泥处理厂费用。

图 15. 若干污泥预处理替代工序的投资、年度运营成本与回款周期(Gorgun 与 Insel 2007)

替代工序	描述	投资成本 (US\$)	年度运营成 本 (US\$)	回款周期
机械筛 (MS)	机械筛能够去除流入的废水中的全部悬浮固体物质。	170,000	17,000	5个月
MS+ 机械增稠器 (MT)	除了机械筛之外，初次污泥与二次污泥都需要经过机械增稠器处理（袋式压滤机）。添加聚合物之后，固体含量大约可达到20%。	290,000	29,000	8个月
MS+MT+ 沉降式离心机 (DC)	初次污泥与二次污泥都需要经过机械增稠器处理，而后再进入沉降式离心机。添加聚合物之后，固体含量大约可达到30%。	600,000	60,000	15 个月
MS+MT+DC+ 污泥干燥机 (SD)	与上一选项对比，固体含量能够提高到90%。	5,400,000	195,000	9年
MS+MT+厌氧分解器 (AD)	厌氧分解器需要4-6%的固体含量，方能实现最优运营。厌氧分解器可以制造用于发电或污泥干化的生物气体。厌氧分解器还能降低污泥的有机物含量。	2,690,000	36,000*	5.5年
MS+MT+AD+DC	除了厌氧分解之外，沉降式离心机可将固体含量提高到90%。	3,000,000	66,000*	5.7年

* 包含了厌氧分解器的能源回收

4.2. 贮存、处理与喂料系统

在大部分例子中，都有专门的卡车负责将预先处理后的燃料运送至协同处置水泥厂的贮存区。废物材料必须根据法律法规的要求妥善贮存与厂区。蒸汽过滤与捕集设备必须到位，以最小化卸载材料时可能对收货现场和周围区域造成的影响(WBCSD 2005)。自动化传送机将废物从贮存区输送到水泥窑系统的进料点。配料系统能够精确地控制水泥窑的合理喂料速度(ALF-CEMIND 2012) (图28)。根据澳大利亚所作的一项有关于水泥厂使用污泥的可行性研究，APP (2011) 指出，干污泥在水泥厂的收货、贮存、输送及喂料需要大概235千瓦时的电量。预计该系统每年处理60000吨干污泥的资本投入大概为600万到1150万美元(APP 2011)。

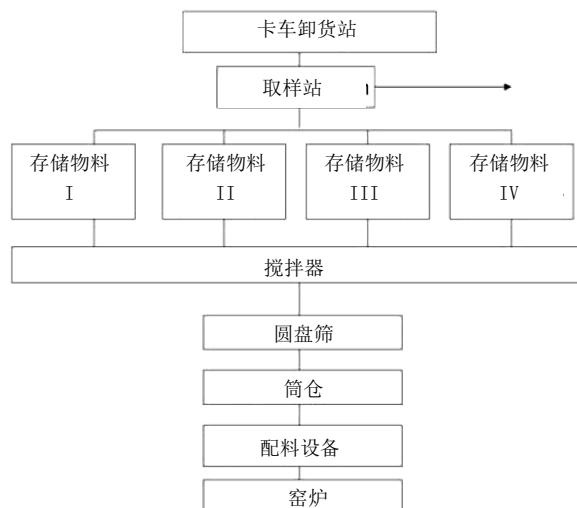


图 28. 水泥厂废物燃料的处理(Reinhard 2008)

4.2.1. 贮存

替代燃料的贮存装置有多种类型，包括带回收设备的贮存槽或带排放装置的贮存筒仓。具体采用何类贮存装置，取决于废料的类型。而RDF必须存储于工业库房，以保持RDF的水分含量和其他特性，并且最小化变质、臭味及泄漏风险。

污泥具有很强的腐蚀性，且视固体物质含量高低，极可能在使用过程中发酵(ALF-CEMIND 2012)。污泥自身具有的发酵或自热特性，可能导致贮存与粉磨装置的火灾或爆炸(Takx 2002)。在设计水泥厂的处理与存储设备时，应当对这类特性予以关注。配备专门机械卸料装置（锥形卸料器或平底卸料装置）的密闭圆柱型筒仓，通常用于污泥存储以最小化对健康的危害。通常情况下，贮存仓都配有专门的锥形卸料器(ALF-CEMIND 2012)。

4.2.2. 装卸与输送机

根据系统配置与废物类型的不同，水泥厂内的废物燃料通过气动或机械输送系统实现水泥窑喂料。机械输送系统所需能源较少。机械输送系统有多个类型(ALF-CEMIND 2012)（图29所示）。固体物料装卸系统需要配备粉尘控制系统。



图 29. 机械输送系统(Hock 2008)

4.2.3. 喂料与配料系统

根据废物燃料喂料点的不同，可采用多种类型的喂料系统。无论采用何类喂料系统，都需保证高度的精确性和连贯性，避免因为阻塞而引起故障，同时能够灵活地适配各类燃料。图30与图31介绍了装卸系统与配料系统如何将RDF分别喂入煅烧炉及水泥窑。

废物衍生燃料配料系统

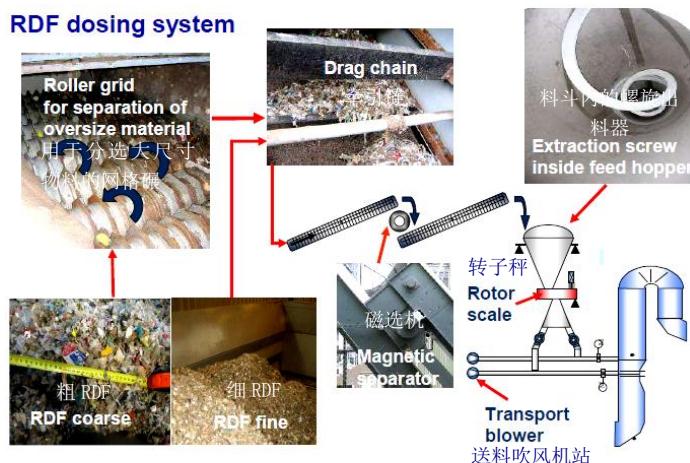


图 30. RDF 装卸与配料系统将 RDF 喂入煅烧炉示例(Hempel 2011)

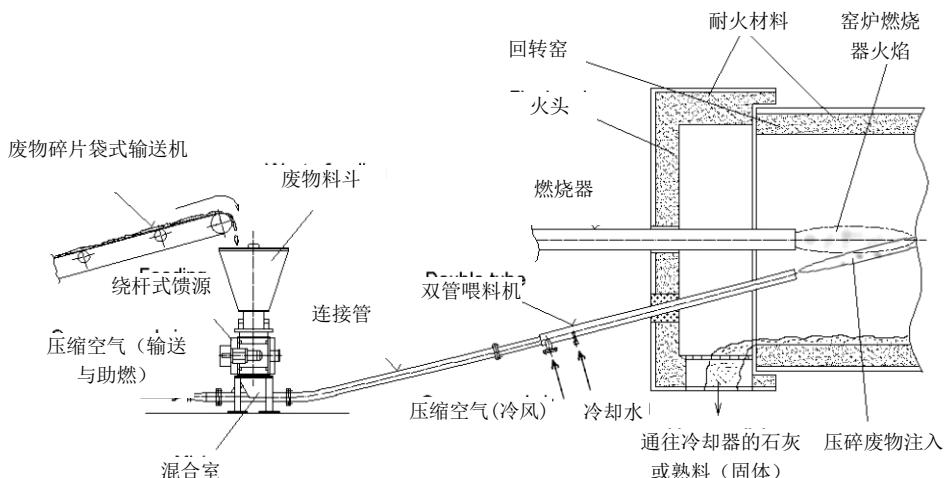


图 31. RDF 装卸与配料系统将 RDF 喂入水泥窑主燃室示例 (Stehlik 等人, 无日期)

配料系统按照预先设定的速率将燃料喂入水泥窑。视乎废弃物而定，可采用不同类型的喂料系统。例如，Schenck Process公司的转子称量喂料器以及FLSmidth PFISTER公司的旋螺称量喂料器（图32）。另一例子是Cadence公司的窑中燃料喷射器（图33）。废物衍生性燃料就盛放在这一随水泥窑旋转的装置内。当喷射器位于垂直位置时，燃料就由机械装置滴入水泥窑中部。这种系统能够快速地安装在水泥窑上。它所需的回款周期为一年或更短时间(Cadence 2012a)。

土耳其Heidelberg水泥公司在某年协同处置45000吨污泥的水泥厂所安装的贮存与喂料系统共花费了280万美元⁹。

⁹水泥可持续性发展倡议组织 (CSI), 私人通信. 2012 年 6 月.

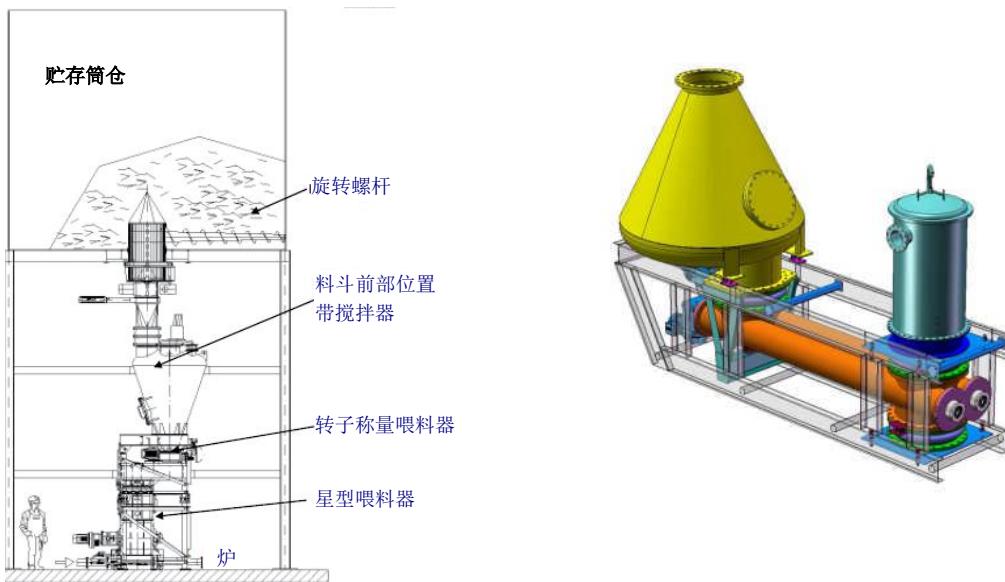


图 32. 用于固体废物燃料配料的转子称量喂料器（左）与旋螺称量喂料器（右）
(Leong 2008; Schenck Process 2009)



图 33. Cadence 公司的窑中燃料喷射器技术(Cadence 2012a)

4.3. 水泥窑协同处置城市固体废弃物与污泥

通常说来，RDF可以替代全世界水泥厂15-20%的主要化石燃料(Alf-Cemind 2012)，但这一比率亦可高达30%(Murray与Price 2008)甚至60%¹⁰（使用高品质RDF的情况下）。污泥最大喂料速度不到超过熟料生产能力的5%。因此，对于一个日生产能力为2000吨的水泥窑而言，在不降低熟料品质的情况下，每天处理的污泥数量最高为100吨(Alf-Cemind 2012)。欧盟委员会(2004)指出，污泥可以替代高达20%的水泥厂主要化石燃料。

以RDF替代煤炭或石油焦将导致产出的废气上涨15%。在一个持续鼓风且烟气排放值受到限制的系统内，RDF的使用可以通过两种方式进行调节：1) 热力条件，即温度变化，可通过少量的二次风得以维持（干烟气的O₂含量将减少），或2) 通过保持稀释倍数，从而维持废气的O₂浓

¹⁰水泥可持续性发展倡议组织 (CSI)，私人通信. 2012 年 6 月。

度不变及降低燃烧温度。不论选择何种方式，都能够降低氮氧化物的形成速度(Genon与Brizio 2008)

4.3.1. 替代能源喂料点的选择

鉴于水泥生产流程各部分的温度差异，废料是否能够在恰当的时间点（喂料点）投入，是确保燃料充分燃烧或融合以及避免多余烟气排放的关键。喂料点的选择需要根据废物燃料的属性进行 (WBCSD 2005)。最为常用的废物投入水泥生产流程的喂料点包括(『斯德哥尔摩公约』 2006):

- 回转窑进口端的主燃室
- 回转窑进口端过渡室的喂料槽（用于块状燃料）
- 连接二燃室的送风立管
- 连接预分解炉的预分解炉燃烧器
- 连接预分解炉的喂料槽（用于块状燃料）
- 湿法或干法长回窑的窑中阀（用于块状燃料）

如何在恰当的喂料点将废物燃料投入水泥窑并获得理想的温度和停留时间，取决于水泥窑的设计、类型与运行（图34）。总体上来说，水泥窑的运行必须确保废物协同处置时产生的气体即使在最糟糕的条件下也能获得有效控制，且温度达到850°C并停留2秒。倘若参与协同处置的废弃物的卤化有机物（氯）含量超过1%，那么这一温度必须提高到1100-1200°C并至少停留2秒 (EIPPCB 2010)。

含高度稳定分子（如高度氯化化合物）的废物燃料，在主燃室的高温和长停留时间下能够确保充分燃烧。含有挥发性有机化合物的废弃物必须经主燃室、中窑、送风立管或预分解炉处理，但是不得同其他未经处理的材料混合使用，除非实验证明这么做的话不会对废气造成影响 (WBCSD 2005)。危险废弃物需投入预热/预分解炉的主燃室或二燃室。投入主燃室的危险废弃物或其他类型废弃物，将在火焰温度超过1,800°C的氧化条件下被分解。喂入二燃室、预热器或预分解器的废弃物，将在燃烧带温度超过1000°C的情况下被分解(『巴塞尔公约』 2011)。除开停机操作之外（此时无法达到理想的温度和停留时间），废弃物必须持续不断地喂入水泥窑系统(EIPPCB 2010)。

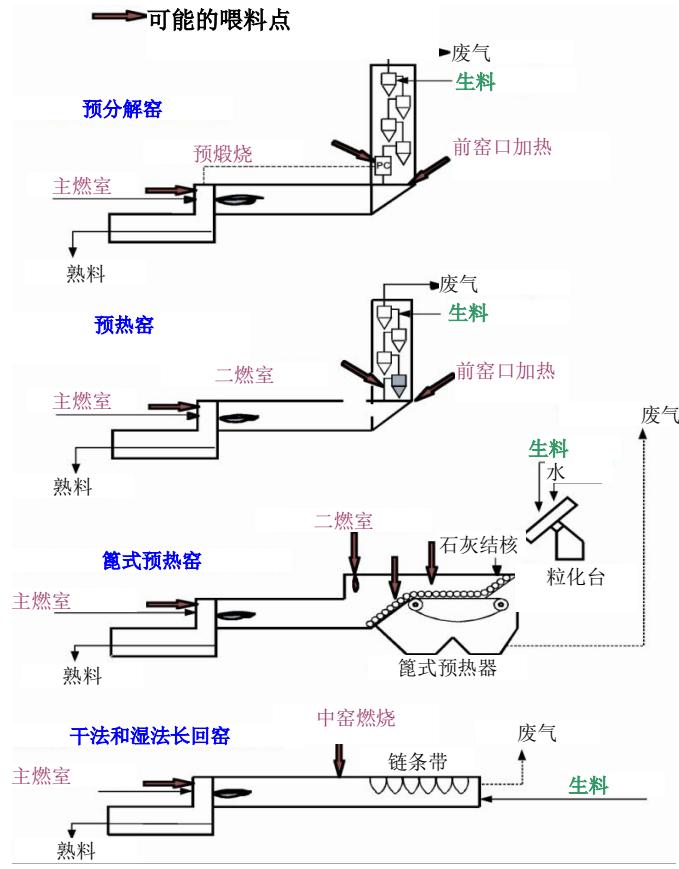


图 34. 常见的废物喂料点(『巴塞尔公约』 2011)¹¹

4.3.2. 多燃料燃烧器

水泥厂在进行协同处置之前必须进行改造，其中最重要的改造之一，便是安装能够应付传统主要化石燃料和废物衍生燃料的燃烧器。现如今最为通用的燃烧器类型就是所谓的多燃料燃烧器，且几乎所有的设备供应商都有提供(ALF-CEMIND 2012)。KHD公司的PYRO-Jet燃烧器（图35）就是一个例子；瑞士人使用这种多燃料燃烧器，各种燃料的比例如下(Hand 2007)：

- 25%煤炭
- 19%石油
- 13%溶剂
- 34%塑料 (<10 mm)
- 9%污泥

¹¹参考附录 2，了解不同窑炉技术的反应带草图。

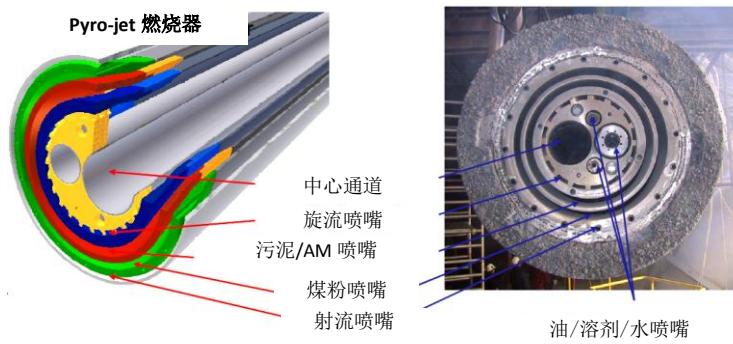


图 35. 某款多燃料燃烧器的剖面图(Hand 2007)

多燃料燃烧器由若干同心管组成。同心管之间的气隙，是注入压缩助燃空气的地方。蒸汽被用于协助燃料的注入。在同心管内部或临近区域，管道上安装有专门的喷嘴，用于注入二次空气/液体化石燃料和替代燃料。由于具有所有同心管中最大横截面，内胆被作为固体废物燃料通过的渠道(ALF-CEMIND 2012)。

部分商业多燃料燃烧器如下：

- Cadence 环境能源公司的 SUSPENSION 燃烧器¹²
- FCT-Combustion 公司的 FCT 多燃料窑炉燃烧器¹³
- FLSmidth 公司的 DUOFLEX 燃烧器¹⁴
- Greco-Enfil International S.L. 公司的 LOW-NOx FLEXIFLAME™ 燃烧器¹⁵
- KHD Humboldt Wedag GmbH 公司的 PYRO-JET® 燃烧器与 PYROSTREAM® 燃烧器¹⁶
- PILLARD FEUERUNGEN GmbH 公司的 ROTAFLAM® 回转窑燃烧器与锻造燃烧器¹⁷
- Polysius AG 公司的烧结带燃烧器¹⁸
- Unitherm Cemcon Firingsystems GesmbH 公司的 M.A.S. 燃烧器以及 UNICAL 煅烧炉燃烧器¹⁹

附录9是水泥行业替代燃料预处理与协同处置的技术供应商名单。

4.3.3. 协同处置所需的额外窑炉系统改善/改造

固体替代燃料的燃烧与煤炭有诸多差别(Jensen 2008):

- 热解速度对替代燃料燃尽的影响更大。
- 与煤炭燃烧速度相比而言，氧气的扩散在更大程度上限制了替代燃料的燃烧速度。
- 温度对替代燃料燃尽的影响不大。

¹² <http://www.cadencerecycling.com/>

¹³ <http://www.fctinternational.com/>

¹⁴ <http://www.flsmidth.com/>

¹⁵ <http://www.grecoenfil.com/>

¹⁶ <http://www.humboldt-wedag.de/>

¹⁷ <http://www.pillard.de/>

¹⁸ <http://www.polysius.com/>

¹⁹ <http://www.unitherm.co.at/>

- 粒度不仅与替代燃料的筛余量有关。

图36介绍了粒度与不同类型固体燃料燃烧时间的关系。由于粒度较大，固体替代燃料通常需要更长的燃尽时间。除非工厂设计考虑了这一现象，否则这可能因此常规水泥窑的一系列操作问题(Jensen 2008)。

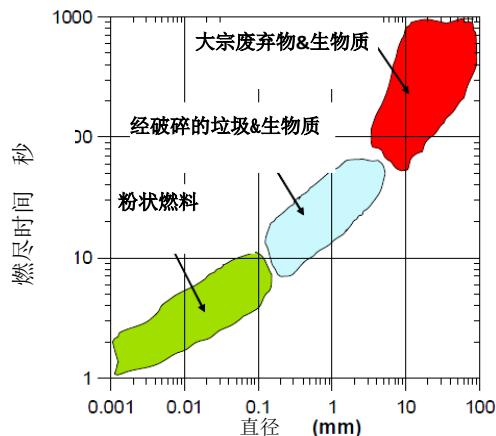


图 36. 粒度与水泥窑类不同类型燃料燃尽时间的关系 (Jensen 2008)

煅烧炉配置与改进

不同类型的煅烧炉配置，适用于具有不同特性的各类替代燃料，同时解决了上述的燃尽时间问题（图37）。对于经过破碎的废物与生物质而言，煅烧炉停留时间的延长将确保燃烧更充分的燃烧；但是对于庞大的生物质与废物流而言，就有需要进行设计变更（图36），例如安装额外的设备（例如KHD Humboldt Wedag公司的燃烧室或FLSmidth公司的HOTDISC）。

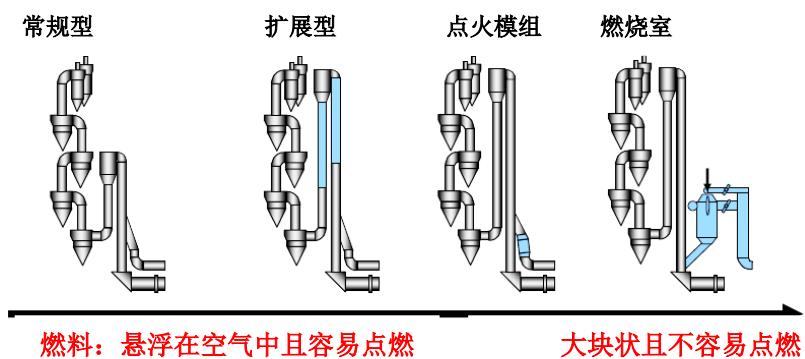


图 37. 用以替代燃料协同处置的不同煅烧炉配置 (Hand 2007)

KHD Humboldt Wedag公司的燃烧室是窑炉系统新增加的部分。它允许在协同处置过程中使用更多的低品质替代燃料（图38）。挪威的一家水泥厂自2004年以来就一直使用该燃烧室。自从改造之后，窑炉系统60%的燃料都喂入燃烧室。燃料成分为6%的煤炭/石油焦/动物骨粉，16%的固体危险废物以及38%的废物衍生燃料。

PYROCLON[®]-R 燃烧室的煅烧

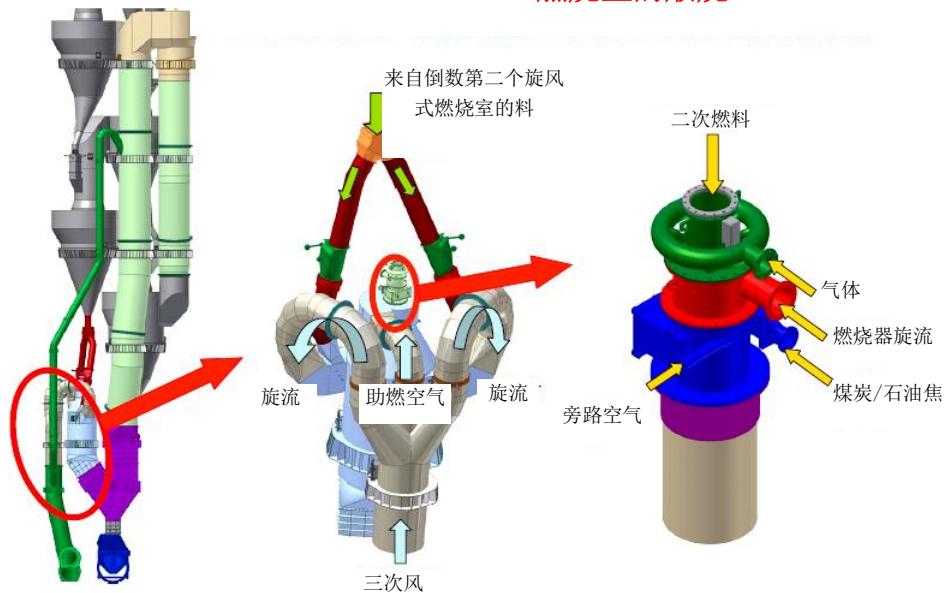


图 38. 配置 KHD Humboldt Wedag 公司燃烧室的预分解炉(Hand 2007)

FLSmidth作为另一重要的水泥技术供应商，提供着包括HOTDISC在内的协同处置替代燃料煅烧炉解决方案(Jensen 2008)。HOTDISC被加装到煅烧炉上，承担着个平底炉的功能。当替代燃料、石灰生料以及三次风进入HOTDISC时，就产生了燃烧气体、部分煅烧石灰、以及燃烧残余。而后，这三类生成物与其他材料一道在煅烧炉中处理（图39）。最终产出适合石灰窑使用的煅烧石灰，且烟气排放也获得较好的控制。替代燃料的热力成分被用于煅烧过程。燃料停留时间的延长，能够最小化水泥窑入口端挥发性循环与阻塞的风险(FLSmidth 2011)。

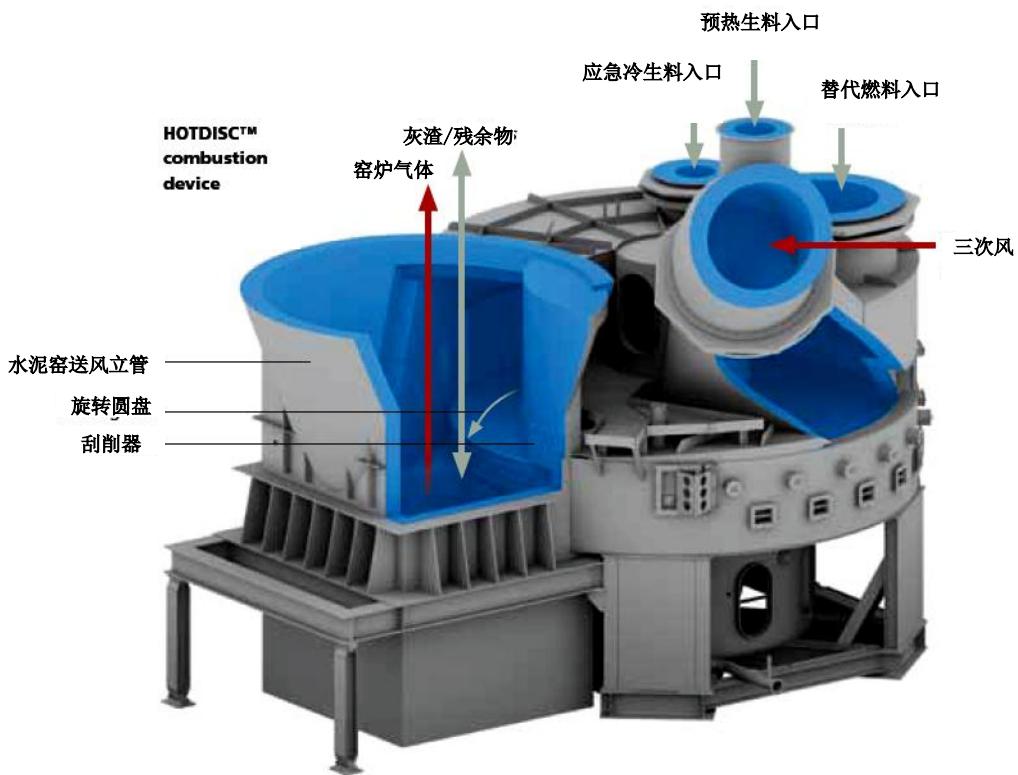


图 39. FLSmidth 公司的 HOTDISC(FLSmidth 2011)

水泥窑混合空气技术

高温且富含氧的气体可能沿着窑炉顶部及冷却器流动，而富含氧的气体有可能沿着底部流动。这类气体分层阻碍了燃烧过程，限制了替代燃料的效用，且导致了烟气排放。因此，需要往窑内加入高速反向混合气体流，以促进窑内分层的气体循环和混合（图40）。这种循环改善了燃烧效率，提升了替代燃料效用，大幅减少氮氧化物，降低烟气排放，减少硫的富集，提高热效率，并最终改善整体产品质量(ALF-CEMIND 2012)。

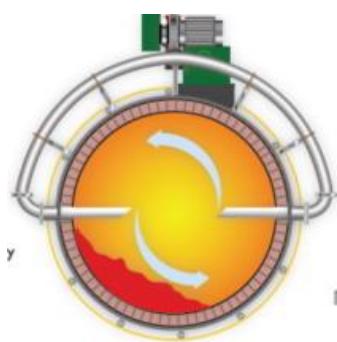


图 40. 混合空气技术(ALF-CEMIND 2012)

用于固体废物燃料混烧的旋流器

固体废物燃料由压缩空气通过管道系统输送至燃烧器。燃烧器内部的废物燃料渠的直径与燃料输送管道一致。旋流器可以安装在这根管道的热端，并由其决定着燃料的固定旋转方向。这一旋转过程所需的空气来源于燃烧器的一次风管道系统，因此无需使用压缩空气。旋流器有围绕

着废物燃料管道的插槽(ALF-CEMIND 2012)。低旋流强度导致大抛投长度，而高旋流强度增加了抛投角度，因此替代燃料被转向了火焰之中，且燃尽的时间也相应延长（图41）。

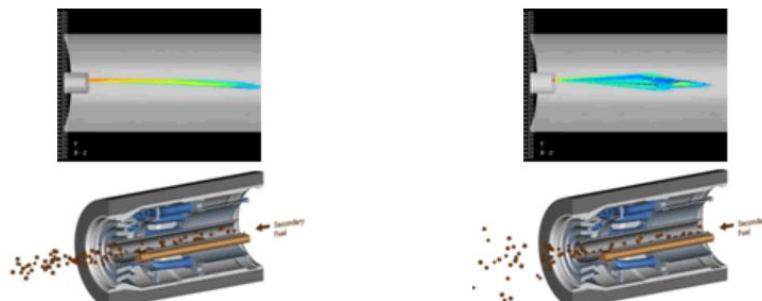


图 41. 旋流器提供的低旋流强度
(左) 与高旋流强度 (右) (Unitherm Cemcon 2012)

4.4. 产品质量控制系统

根据协同处置过程所使用的替代性原料与燃料的数量，产成品单个元素的浓度相较仅使用传统化石燃料而言，可能上升亦可能降低。由于水泥需要与砂石搅拌以制造混凝土或砂浆，因此建筑材料（混凝土或砂浆）内痕量元素的行为是决定协同处置产成品的环境影响及产品质量的重要因素（CEMBUREAU 2009）。

由于重金属被牢牢地固定，因此混凝土或砂浆释放的重金属微乎其微。对混凝土与砂浆的独立测试表明，重金属元素的浸出水平远远低于国家法律规定的限值。除此之外，如前文所述，按照欧洲水泥行业协会的说法，含重金属元素的产品储存于极端条件下之时，并未检测到环境释放(CEMBUREAU 2009)。

磷酸盐含量影响着水泥固化时间。氯（在水泥中的含量不得高于0.1%）、硫以及碱含量都影响着整体产品质量。因此，在水泥厂协同处置废弃物时，必须检测熟料与水泥内的此类元素含量。由于可能造成过敏反应，因此必须检测水泥窑粉尘与产成品的铊与铬含量（斯德哥尔摩公约 2006）

4.5. 排放与大气污染物

水泥窑排放来源于原材料的物理化学反应过程以及燃料燃烧。水泥窑废气的主要成分是来自于助燃空气的氮、来源于煅烧过程与燃料燃烧的CO₂、来自于燃烧过程与原材料的水汽、以及多余的O₂。废气内同样包含少量的粉尘、氯化物、氟化物、二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳、以及数量更少的有机化合物与重金属(Stantec 2011)。

4.5.1. 协同处置对水泥窑排放的影响

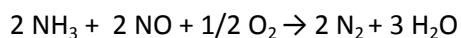
倘若协同处置过程操作正确且严格遵照法规，那么废物协同处置对水泥制造过程的烟气排放影响微乎其微。然而，务必将废物燃料内所含的氮、硫、氯及其他元素与化石燃料内的同类元素浓度进行比较。下面将对部分重要元素进行更为详细的介绍。

硫

由于熟料具有碱性特点，因此废物燃料所含的硫元素并不会造成大量的含硫气体排放。然而，应当考虑硫元素与石灰生料的不同金属产生反应的可能性。替代原料的硫浓度通常低于常规化石燃料的参考值（RDF为0.1-0.2%，化石燃料为3-5%）。因此，替代燃料所含的硫并不会导致沉淀或阻塞问题。不过，还是需要评估熟料发生碱螯合或转移的可能性(Genon 与 Brizio 2008)。

氮氧化物

氮的存在是形成氮氧化物的原因。通常说来，氮氧化物的形成取决于燃料内氮的数量、窑炉的温度、停留时间、以及燃烧器的类型(Genon与Brizio 2008)。相较于化石燃料（1.5-2%）而言，RDF的氮含量比较低（0.3-0.5%）。总体上说来，替代燃料不会导致氮氧化物排放量增加，且在部分情况下，使用废物燃料时的氮氧化物排放量甚至更低（Genon与Brizio 2008）。使用化石燃料加热到1450°C以烧结原料的回转窑，会排放出大量的氮氧化物气体。当脱水污泥注入水泥窑时，脱水污泥所含的氨元素将分解氮氧化物，反应方程式如下：



其中：

NH_3 = 氨气

NO = 一氧化氮

N_2 = 二氧化氮

H_2O = 水

图 42 是注入脱水污泥时，水泥窑产生氮氧化物排放的示例。与仅仅使用传统燃料（如煤炭）相比，污泥能够减少 40% 的氮氧化物。同理，三代燃烧器所需的一次风数量少，导致了火焰温度低且阻止了污泥所含氮元素热转化成氮氧化物（Zabaniotou 与 Theofilou）。然而，必须审慎控制燃料中污泥的比率（Fytilli 与 Zabaniotou 2008）。

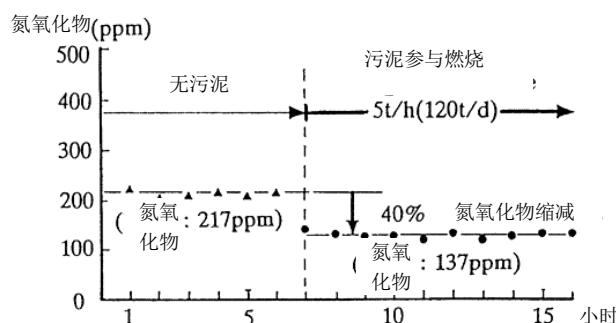


图 42. 水泥窑协同处置和未协同处置污泥时的氮氧化物排放(Taruya 等人.2002)

氯

T 废物燃料所含的氯元素可能对水泥窑排放与性能造成直接或间接的影响。目前已有多种方法可应对氯元素及其潜在影响，但是对这类影响还是需要有充分的认识和应对手段。馈给料中氯元素的痕量水平可导致HCl与HF等酸性气体的形成(WBCSD 2002)。氯化合物会在窑炉表面集聚

并导致腐蚀(McIlveen-Wright 2007)。在窑炉内加入氯元素也可能增加重金属的挥发性(Reijnders 2007)，并加快二恶英的形成。

Genon与Brizio (2008) 指出，熟料具有碱性特点意味着替代燃料所含的氯元素不会造成大量的气体排放。然而，倘若燃料的氯含量达到0.3-0.5%，就可能导致碱与氯产生反应、氯化物的挥发及其与粉尘的回收、以及需要利用旁路装置（抽出部分烟气）以限制最终熟料的氯化物含量。旁路烟气的高温意味着热量消耗的增加。相较于水泥窑3,000-3,500 MJ/t的总能源消耗，旁路烟气每增加一个百分点，就需要大约20-25 MJ/t的额外熟料 (Genon与Brizio 2008)

重金属

由于产成品较高的金属保有量，因此选用恰当的废弃物仅对金属排放产生微小的影响。非挥发性金属几乎全部固定在熟料中。而半挥发性金属，如铅或镉，更可能在熟料流或粉尘中被捕集 (EIPPCB 2010)。一个采用美国环保局毒性特征溶出程序测试熟料暴露在酸性条件下的重金属活动性的研究发现，仅有镉可以在环境中被检测出，且含量低于法规标准，仅为百万分之五 (ppm) (Shih 2005)。由于更可能蒸发或脱离窑炉系统，因此铅或镉等高度挥发性的金属成为首要的忧虑(EIPPCB 2010)。在传统的焚化过程中，汞（及其他重金属）排放通过湿法清洗机、活性炭和袋式过滤器等组合而获得有效控制。目前还在开发其他类似的水泥窑控制方式，包括采用吸附性材料以捕集汞 (Peltier 2003; Reijnders 2007)。目前，静电除尘器与袋式过滤器是非常同样的除尘装置，但是这两种装置分别仅能捕集25%和50%的潜在汞排放 (UNEP Chemicals 2005)。唯一能够有效控制水泥窑中此类挥发性金属排放的方法，便是限制原材料和废物燃料中此类金属的浓度 (Mokrzycki等人. 2003; UNEP Chemicals 2005)。

通常说来，污泥中所含的汞来自于污泥厂的清洗过程或下水沟 (Zabaniotou与 Theofilou 2008)。美国的Giant Cement公司，将他们水泥窑使用的替代燃料所含的汞与镉的含量分别限制在10ppm与440ppm。这俩限制远远低于铅、铬与锌（分别为2900、7500与90000 ppm）或其他金属的水平(Murray与Price 2008)。

二恶英与呋喃

『斯德哥尔摩公约』要求缔约国减少或消除有意生产、有意使用、无意生产、以及库存与废弃物所产生的持久性有机污染物 (斯德哥尔摩公约 2006)。水泥生产过程形成PCDDs与PCDFs等持久性有机污染物，是一个已知的忧虑。倘若喂入水泥窑的燃料或原材料含有氯元素，那么就有可能形成PCDDs与PCDFs。然而，通过水泥窑的高温和长停留时间可以抑制这两种持久性有机污染物的形成(Karstensen 2008)。

如前所述，废料喂入水泥窑系统的位置是一个重要的因素。在这个例子中，废弃物被喂入主燃系统之后，将达到很高的温度并获得足够长的停留时间，以限制PCDD/PCDF排放。而被喂入二次燃烧带的废弃物可能无法达到足够高的温度或获得足够长的停留时间(EIPPCB 2010)。通过限制原料有机物浓度，以及快速冷却干法和湿法长回窑的废气温度，可以进一步最小化PCDD/PCDF的形成。来自若干在运转水泥窑的证据表明，预热/与分解窑的PCDD/PCDF排放量稍稍低于湿法水泥窑(WBCSD 2002; Karstensen 2008)。

无数研究对比了水泥窑使用传统燃料与废物衍生燃料所形成的PCDD/PCDF多寡，但是都发现两者的排放量差异不大 (Murray 与 Price 2008; EIPPCB 2010)。Karstensen (2008) 查看了超过

2000份PCDD/PCDF水泥窑测量数据，这些数据来自于代表着大部分生产技术与废物喂料情况的各类研究。这些数据普遍表明，大部分现代化水泥窑能够达到0.1 ng I-TEQ/m³的排放水平；此外，谨慎地使用有机危险废弃物和其他废弃物以替代部分化石燃料，并非影响PCDD/ PCDFs形成的关键因素(Karstensen 2008)。

Lafarge调查了将不同废弃物投入地问预热器/预分解器可能产生的影响。表16就是他的调查结果。在中端或进料端位置喂入的废弃物，并没有主燃室喂入的废弃物所呈现的温度提高和长停留时间。所有测量数据都表明，PCDD/PCDFs的可观测浓度水平都很低。报告中的数据表明，水泥窑能够达到0.1 ng I-TEQ/Nm³的排放标准，这也是若干欧洲国家相关危险废物焚化厂法律所规定的限值(Karstensen 2006)。

表 16. 给料至预热器/预分解器对 PCDD/PCDFs 排放的影响(Karstensen 2006)

工厂	替代原料类型	PCDD/F 排放 单位: ng I-TEQ/Nm ³
1	骨粉、塑料与纺织品	0.0025
2	骨粉与浸渍木屑	0.0033
3	煤炭、塑料与轮胎	0.0021 & 0.0041
4	轮胎	0.002 & 0.0060
5	石油焦、塑料与废油	0.0010
6	石油焦、向日葵籽壳与废油	0.01200
7	轮胎废料	0.004 & 0.02100
8	溶剂	0.0700
9	浸渍木屑与溶剂	0.00003 & 0.00145
10	溶剂	0.00029 & 0.00057
11	污泥	<0.0110
12	汽车废件与污泥	0.0036 & 0.07 & 0.0032

至于其他类型的排放，欧盟委员会和CEMBUREAU将废物协同处置可能造成的影响归纳如下(CEMBUREAU 2009; EIPPCB 2010)：

- 协同处置废弃物不会影响粉尘排放。
- 碱性窑炉环境可以在燃烧过程中取出HCl与HF等任何痕量元素。
- 一氧化碳大体上未受影响。
- 使用替代燃料与TOC排放水平之间无关联

表17展示了常用水泥窑使用RDF作为燃料来源后的排放数据。

表 17. 使用 RDF 的水泥的窑排放数据(Stantec 2011)²⁰

参数	单位	测量数据	
		未使用废弃物	使用废弃物
总颗粒物	mg/m ³	2.8 – 12.90	12.0 – 15.900
HCl	mg/m ³	0.88 – 5.93	0.87 – 1.320
SOx	mg/m ³	714 – 878.00	311 – 328.000
HF	mg/m ³	0.13 – 0.23	0.02 – 0.040
NOx	mg/m ³	789 – 835.00	406 – 560.000
总碳量	mg/m ³	11.7 – 23.20	5.7 – 7.100
PAHs *	mg/m ³	–	0.003
苯	mg/m ³	0.27 – 0.540	0.45 – 0.550
Cd	mg/m ³	<0.005	<0.007
Tl	mg/m ³	<0.005	<0.005
Hg	mg/m ³	0.014 – 0.044	0.003 – 0.006
Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn总量	mg/m ³	<0.300	<0.500
PCDD/PCDF, I-TEQ	mg/m ³	0.001 – 0.002	0.005 – 0.006

* PAH =多环芳烃

4.5.2. 排放控制技术

作为最佳可用技术，持续测量能够精确地估量各类排放参数：废气排放量、湿度、颗粒物控制设备的入口端温度、粉尘/颗粒物、O₂、NOx、粉尘、SO₂与CO。而常规定期监测作为最佳可用技术，适合于：金属及其化合物²¹、总有机碳/有机成分、HCl、HF、NH₃与PCDD/PCDF。特定运转状况下，需要进行测量的项目的如下（斯德哥尔摩公约 2006）：

- 水泥窑摧毁与清除POPs的效率
- 苯、甲苯、二甲苯
- 多环芳香烃(PAHs)
- 其他有机污染物（主要有机危险成分，例如氯苯类化合物、以及共平面同源物、氯萘等PCBs）

图43是水泥厂排放测量点的概览。水泥厂排放控制主要采用袋式除尘器捕集废气里的颗粒物；该方法同样控制了大部分的重金属排放。现代化工厂或经改造的工厂可能配有NOx控制设施，具体说来就是选择性非催化还原技术（SNCR）。其他物质的排放，例如POPs或酸性气体，通常透过水泥设备的运转特性进行控制（Stantec 2011）。

²⁰备注：尽管所引用的报告并未明确说明每次使用的废物的来源，但德国的废物衍生燃料通常取自于城市固体废弃物处理（不包括特定的废物流，例如建筑拆迁垃圾）。同样需要指出的是，尽管报告里未指出各参数的监测方法，但是欧盟与北美洲的水泥窑通常使用CEMS 测定硫氧化物和氮氧化物等参数，以及进行其他参数（如PAH、金属等）的定期排放测试。

²¹当作为原料或燃料的废弃物的金属含量较高时，测量金属的重量更为重要。

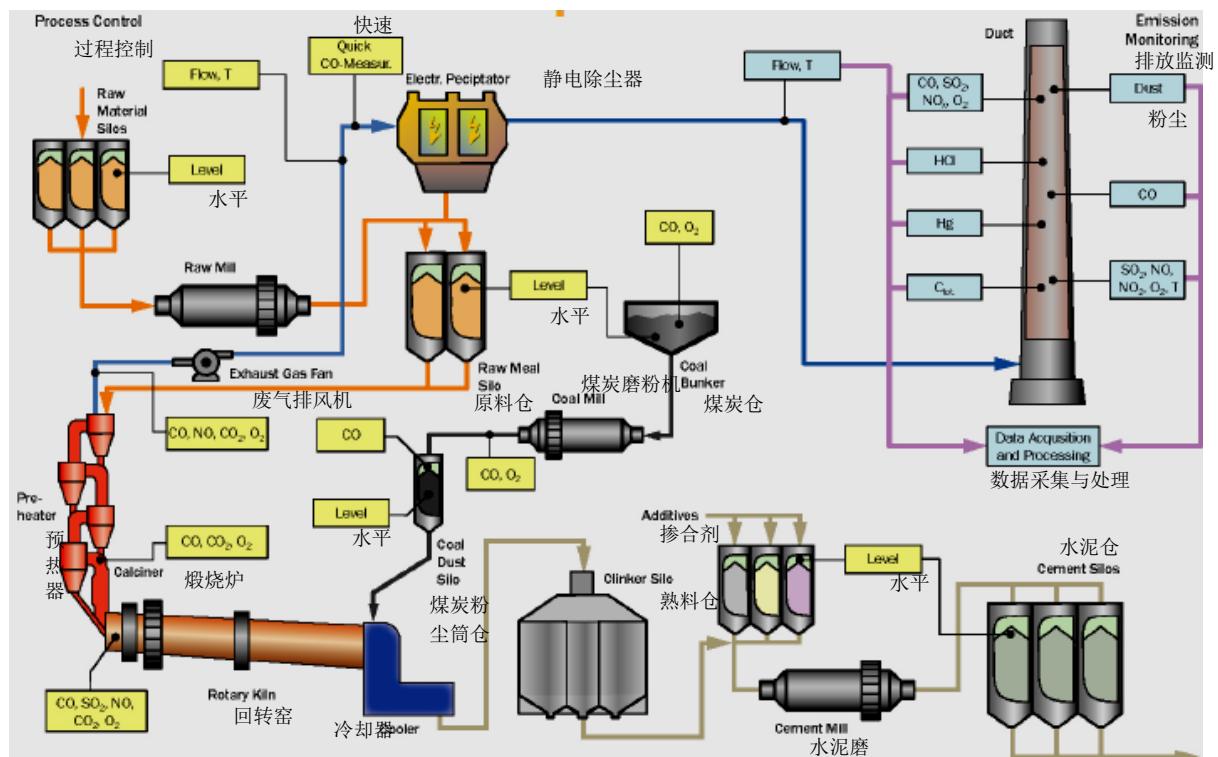


图 43. 水泥厂测量点概述 (Kolyfetis 2007)

Greer (2003) 确定了硅酸盐水泥生产过程气体性污染物的现行和潜在排放控制技术（参见附录6）。Karstensen (2007a and 2008) 同样解释了适于水泥行业的排放控制技术。在欧盟，综合污染防控局提供了可供水泥行业用于排放控制与关联排放水平的最佳可用技术(EIPPCB 2010)。除此之外，斯德哥尔摩公约秘书处已经公布了协同处置废弃物的水泥厂如何防控或最小化意外POPs形成与后续释放的指南(UNEP, 2007)。

4.5.3. 持续烟气排放监测系统

持续烟气排放检测系统 (CEMS) 透过污染物分析仪测量数据以及转换方程式、图表或电脑程序，确定气体或颗粒物的浓度或排放速率，从而获得以适用的排放限值或标准的单位制定的结果。CEMS 是收集过程排放数据以证明环境合规以及控制与优化工厂流程的有用工具。美国环保局和欧盟的部分有关法规要求采用 CEMS，作为持续合规认定或超标认定的评判标准(U.S. EPA 2012c)。

对于有关法规要求的每种污染物和参数，其排放水平与排放值需要在水泥窑运转过程中的每一步骤进行测量，包括开机、停机、混合方式或直接方式（气体通过原料磨或直接进入集尘器），以及对各种原材料和燃料混合物进行测量。测量范围需要根据许可条件和预期浓度而设定。需特别注意取样过程，例如，遵循 ISO 10396: 2007 “固定污染源排放——关于永久安装型检测系统自动确定气体排放浓度的气体采样”的采样流程(WBCSD 2012a)。

采用何种CEMS技术，取决于各类因素，例如 (SICK Sensor Intelligence, 无日期)：

- 气体条件

- 相关气体条件下的分析仪稳定性
- 测量任务
- 待测成分的类别与数量
- 燃料类型
- 运营成本
- 地方法规要求（现行与未来）

CEMS可分为不同类型。CEMS笼统地分为抽取技术与现场技术两个分类（图44）。抽取系统是最为广泛使用的CEMS类型：气体样本远远不断地从生产现场抽取、过滤、传输、调制，最终送入气体分析系统。气体浓度被测量、记录后，作为数据资料储存，而后被用于报告、预警或工厂流程控制。抽取型CEMS通常包含如下主要子系统（K2BW 2012）：

- 样本传输与调制
- 样本气体分析
- 数据采集、报告与系统控制



图 44. 抽取型（左）与现场型（右）CEMS 技术（SICK Sensor Intelligence, 无日期）

附录7是使用CEMS确定水泥厂各类污染物排放的方法推荐。附录8是水泥厂排放测量标准。

4.6. 健康与安全实践

事实证明，废物协同处置能够以环保而稳妥的方式进行。然而，不当的设计或操作可能对当地社区及工人健康造成危害。尽管水泥窑具备了高效热摧毁诸多危险废物的全部理想特性，但是许多水泥窑的设计初衷并非为了废物处理，因此需要在水泥窑具备废物处理能力之前，改造燃料添加系统以及建造废物接收设施。这类设施改造必须经过谨慎的设计和监督，以确保环境与健康影响降到最低水平（Karstensen 2007a）。

水泥窑经过废物处理改造，且通过试燃证明了该系统的运转能够保护人身与环境健康后，需要进行量化风险评估以确定水泥窑可能对当地社区和窑炉操作工造成的潜在负面健康影响。需要对下列与水泥厂生产流程四大主要元素相关的风险进行评估：

1. 运输
2. 贮存与处理

3. 窑炉排放
4. 熟料污染

可以透过三个不同成分对前三个风险进行评估：1) 有毒材料释放风险；2) 人体接触风险；3) 负面健康影响的风险。应对与废物协同处置相关的各类风险，要求对废物化学特性以及废物焚烧产生的副产品有一定的知识。这类知识是计算环境中污染物质迁移与归宿的必要条件 (Karstensen 2007a)。

需要在协同处置开始之前或新材料加入系统之前，及时地向员工和承包商提供简单易懂的安全与应急指引。在操作人员开始操作设备之前，必须回顾与新材料相关的各类风险。进行工作安全分析，是确定各类危险与潜在接触的一部分。此外，还拥有需要合理的控制实践与技术 (WBCSD 2005)。

废物协同处置的大气排放取决于被处理的废物类型以及所采用的工艺。必须根据运营许可和适用的法规，监测和上报排放数据。如有需要，应当采取减排技术。粉尘通常经袋式过滤器处理。此外，还需考虑采取应对噪声与异味的措施。常用的挥发性有机化合物排放控制方式包括：活性炭吸附、热处理与（在特定情况下的）生物处理（巴塞尔公约2011）。

废水排入地表水的，不得造成污染物质浓度超出当地环境水质标准。废水排入公共或私营废水处理系统的，需要满足预处理与处理系统的监测要求，且不得直接或间接地干预系统的运行与维护、对工人健康与安全构成风险、或对废水处理过程的残留物特征构成负面影响（巴塞尔公约 2011）。

倘若城市固体废弃物与污泥的协同处置过程操作正确且遵守严格的环境与排放法规，那么相较于采用化石燃料而言，应当不会造成额外的环境与健康风险。Rovira等人（2011）在西班牙进行的一项研究表明了，居住在Vallcarca污泥协同处置水泥厂附近的居民所面临的人类健康风险与先前进行的单独使用石油焦作为燃料的研究相当。且基于国际标准，这两个案例的排放数据都是可以接受的（Rovira等人,2011）。而由Schuhmacher等人对另一家西班牙水泥厂进行的研究，表明了水泥厂使用污泥并不会增加工厂周边居民所面临的与金属和PCDD/PCDFs有关的风险（Schuhmacher等人,2009）。

Zabaniotou与Throfilou（2008）在塞浦路斯进行的一项研究，评估了水泥厂协同处置湿污泥（水分含量在65-70%之间）的影响。他们测量了环境气体排放量，尤其是重金属（特别是汞）浓度。他们二人最后得出结论，认为协同处置污泥不会排放对人体健康有害的PCDDs/PCDFs物质（Zabaniotou与Throfilou, 2008）。

尤须指出的是，上述各案例的水泥厂都遵守着所在国严苛的环境与排放标准，并且都采取必要措施确保排放值低于许可水平。

GTZ/Holcim（2006）对水泥厂协同处置废物的健康与安全议题进行了更为详致的探讨。欲了解更多有关水泥行业健康与安全的信息，请参考WBCSD水泥永续发展组织第三工作组有关于健康与安全的报告（WBCSD 2012b）。

5. 总结

本报告回顾了水泥行业协同处置城市固体废弃物与污泥的国际最佳实践，介绍了协同处置的基本原理、国际协同处置的最佳监管与制度实践范例、以及预处理与协同处置技术层面的国际最佳实践。

水泥行业协同处置废弃物的原因与动机多种多样，包括：节约燃料成本（尤其是面临着燃料价格不断上涨）、保护不可再生化石燃料、减少因燃料开采活动而对环境造成的危害、削减温室气体排放、协同处置相较于焚化与掩埋法而言更具优势、在熟料中掺入废物灰渣、以及避免焚化炉或垃圾掩埋场的新投资等等。

世界各地不同的研究已经表明，倘若城市固体废弃物与污泥的协同处置过程操作正确且遵守严苛的环境与排放法规，那么相较于水泥生产过程使用传统化石燃料而言，使用废物燃料并不会造成额外的环境与健康风险。

“谁污染谁治理”的原则必须贯彻到协同处置的经济分析中。根据该原则，那些制造了废弃物的单位（例如工厂）或负责废弃物清理的单位（例如市政当局）必须确保采用最佳、最环保的废物治理方式，并为此支付费用。

部分政策使得城市固体废弃物和/或污泥协同处置更具有经济吸引力。这类政策包括限制城市固体废弃物与污泥的掩埋，提高化石燃料价格、征收碳排放税以及实施碳交易计划。

行之有效的监管和制度框架是确保水泥行业协同处置废弃物不对环境与健康产生负面冲击的重要手段。实行综合固体废物管理模式以及实施与环境绩效、产品质量、运营与安全、许可、以及监测和上报有关的法规标准，是可持续的协同处置行业监管框架的重要组成部分。过去几十年来，世界各地的经验，催生了一系列行之有效的政策措施与实践。正埋首发展协同处置业的国家，可以从这类经验（许多经验都在本报告中提及）中学习如何设计与创建一个环保而稳妥的协同处置行业。

从技术角度来看，废弃物的预处理与处理通常是水泥行业协同处置废弃物的前奏。为满足城市固体废弃物与污泥的贮存、输送、配料、喂料及协同处置的要求，以及对烟气排放进行测量与控制，通常需要对工厂进行改造或在厂区安装新设备和采用新技术。为确保水泥行业环保而稳妥地协同处置废弃物，应当尽可能地在预处理与协同处置过程中采用最佳可行技术（BAT）。

致谢

根据与美国能源部订定之 DE-AC02-05CH11231 合同，美国环境保护局以及工业生产力研究所为本次工作提供了协助。在此，作者要感谢世界企业永续发展委员会水泥行业永续发展小组 Howard Klee 先生、美国环保局 Suzanne Giannini-Spohn 先生、工业生产力协会 Jigar Shah 先生与 Julia Reinaud 女士、以及 Holcim 公司的 Bruno Fux 先生与 Thomas Guillot 先生，谢谢他们的宝贵支持与付出。我们要感谢 Nan Wishner 编辑了本报告。同样我们要感谢劳伦斯伯克利的 Cecilia Chen 先生对本报告格式的指导。

参考资料

- ALF-CEMIND. 2012. Supporting the use of alternative fuel in the cement industry-Technology guide. Available at <http://www.alf-cemind.com/cd/index.htm>
- ALF-CEMIND. 2012. 支持水泥行业使用替代燃料——技术指导. 网址: <http://www.alf-cemind.com/cd/index.htm>
- Anlagenbau GmbH. 2012. Solar Drying of Sewage Sludge. Available at <http://www.wendewolf.com/klsbesch.php?lang=en>
- Anlagenbau GmbH. 2012. 太阳能干化污泥. 网址: <http://www.wendewolf.com/klsbesch.php?lang=en>
- Anton, D. K. 2008. Australian Environmental Law: A Federal Overview (June). Available at SSRN: <http://ssrn.com/abstract=1141711>
- Anton, D. K. 2008. 澳大利亚环境法: 联邦概述 (六月) . 网址: <http://ssrn.com/abstract=1141711>
- Asia Pacific Partnership Cement Task Force (APP). 2010. Project Final Report Form, Project No. CMT-07-07(3) Utilizing Biosolids in Cement Kilns. (November).
- 亚太地区清洁发展与大气合作组织水泥工作组 (APP) . 2010. 项目最终报告, 项目编码 CMT-07-07(3) 水泥窑使用生物固体. (十一月)
- Asia-Pacific Partnership on Clean Development and Climate (APP). 2011. Utilising Biosolids in Cement Kilns. Final Report. Available at www.asiapacificpartnership.org
- 亚太地区清洁发展与大气合作组织. 2011. 水泥窑使用生物固体. 最终报告. 网址: www.asiapacificpartnership.org
- Australian Cement Industry Federation. No date. Biosolids in cement production. Available at www.cement.org.au/file_download/7/Biosolids
- 澳大利亚水泥行业协会. 无日期. 生物固体参与水泥生产. 网址: www.cement.org.au/file_download/7/Biosolids
- Battelle. 2002. Toward a Sustainable Cement Industry. March.
- Battelle. 2002. 创建一个可持续发展的水泥行业. 三月
- Basel Convention. 2011. Technical guidelines on the environmentally sound co-processing of hazardous wastes in cement kilns- Revised final version (31 October 2011). Available www.basel.int/Portals/4/.../docs/pub/.../cement/tg-cement-e.doc
- 巴塞尔公约. 2011. 水泥窑环保而稳妥地协同处置危险废物技术指南——修订最终版 (2011年10月31日) . 网址: www.basel.int/Portals/4/.../docs/pub/.../cement/tg-cement-e.doc
- Bernard, D. 2006. "French Experience in Waste Recovery in Cement Kilns". Available at: http://www.polskicement.com.pl/4/artykuly/36_35.pdf Accessed on April 13, 2012
- Bernard, D. 2006. "水泥窑废物回收的法国经验". 网址: http://www.polskicement.com.pl/4/artykuly/36_35.pdf 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日.
- Bilitewski, B., G. Härdtle, K. Marek. 1997. Waste Management. Berlin: Springer. ISBN: 3-540-59210-5.
- Bilitewski, B., G. Härdtle, K. Marek. 1997. 废物管理. 柏林: Springer. ISBN: 3-540-59210-5.
- Bolwerk, R. n.d. "Co-Processing of Waste and Energy Efficiency By Cement Plants." Parallel Session on Innovate Energy Efficiency Examples of Different Industrial Sectors – Energy Efficiency in the Cement, Metal and Petrochemical Industry.
- Bolwerk, R. n.d. "水泥行业协同处置废物以及能源效率". 关于不同工业领域创新能源效率案例的并行对话——水泥、金属与化工行业的能运效率.

- Bolwerk, R., G. Ebertsch, M. Heinrich, S. Plickert, and M. Oerter. 2006. "German Contribution to the Review of the Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries – Part II: Cement Manufacturing Industries."
- Bolwerk、R., G. Ebertsch、M. Heinrich、S. Plickert 与 M. Oerter. 2006. "德国对于审核水泥与石灰制造行业最佳可用技术参考文件的贡献——第二部分：水泥制造行业"
- Boral Cement. 2011. Project Report: Utilizing Biosolids in Cement Kilns, Asian-Pacific Partnership on Clean Development and Climate, CMT-06-07-sub3. December.
- 博罗水泥. 2011. 项目报告：水泥窑使用生物固体. 亚太地区清洁发展与大气合作组织, CMT-06-07-sub3. 十二月.
- Busato, L.C. n.d. Dioxins and Furans in Brazil: the Formation and Emission in Cement Kilns within the Framework of the Stockholm Convention.
- Busato, L.C. n.d. 巴西的二恶英与呋喃：斯德哥尔摩框架下的水泥窑形成与排放.
- Cadence. 2012a. Cadence Fuel Injector. Available at
<http://www.cadencerecycling.com/fuelinjector.html>
- Cadence. 2012a. Cadence燃料喷射器. 网址: <http://www.cadencerecycling.com/fuelinjector.html>
- Campisano, K. 2011. Beneficial Use of Biosolids in Cement Production. Available at
www.biosolids.com.au
- Campisano, K. 2011. 水泥生产过程使用生物固体的好处. 网址: www.biosolids.com.au
- Caputo, A.C. and P.M. Pelagagge. 2002. "RDF production plants: Design and costs." Applied Thermal Engineering 22 (2002): 423–437
- Caputo, A.C. 与 P.M. Pelagagge. 2002. "废物衍生燃料制造厂：设计与成本". 应用热力工程学22 (2002): 423–437
- CEMBUREAU (The European Cement Association). n.d.. "Lifting the waste status must be subject to strict conditions." Available at: <http://www.cembureau.eu/newsroom/article/lifting-waste-status-must-be-subject-strict-conditions> Accessed on April 13, 2012
- CEMBUREAU (欧盟水泥协会) . n.d.. "废物处理必须严格进行". 网址:
<http://www.cembureau.eu/newsroom/article/lifting-waste-status-must-be-subject-strict-conditions> 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日.
- CEMBUREAU (The European Cement Association). 2009. Sustainable Cement Production: Co-processing of Alternative Fuels and Raw Materials in the European Cement Industry. Available at <http://www.cembureau.be/sustainable-cement-production-co-processing-alternative-fuels-and-raw-materials-cement-industry>
- CEMBUREAU (欧盟水泥协会) . 2009. 可持续的水泥生产：欧洲水泥行业协同处置替代燃料与原材料. 网址: <http://www.cembureau.be/sustainable-cement-production-co-processing-alternative-fuels-and-raw-materials-cement-industry>
- CEMBUREAU (The European Cement Association). 1999. Environmental Benefits of Using Alternative Fuels in Cement Production: A life cycle approach. Available at
<http://www.cembureau.be/library/cembureau-publications>
- CEMBUREAU (欧盟水泥协会) . 1999. 水泥生产过程使用替代燃料的环境益处：生命周期法. 网址: <http://www.cembureau.be/library/cembureau-publications>
- Cement Industry Federation. 2009. Australia Cement Industry Sustainability Report 2009.
- 水泥行业协会. 2009. 澳大利亚水泥行业可持续报告 2009
- Clean Air Act (CCA). 2012. Title 40: Protection of Environment. Available at:
<http://ecfr.gpoaccess.gov/cgi/t/text/text->

[idx?c=ecfr&sid=18c6ff99757e23f30b32ea68a15c92db&rgn=div6&view=text&node=40:6.0.1.1.1.17&idno=40](http://ecfr.gpoaccess.gov/cgi/t/text/text-idx?c=ecfr&sid=18c6ff99757e23f30b32ea68a15c92db&rgn=div6&view=text&node=40:6.0.1.1.1.17&idno=40) Accessed on April 13, 2012

清洁空气法 (CCA) 2012. 第 40 款: 环境保护. 网址: <http://ecfr.gpoaccess.gov/cgi/t/text/text-idx?c=ecfr&sid=18c6ff99757e23f30b32ea68a15c92db&rgn=div6&view=text&node=40:6.0.1.1.1.17&idno=40> 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日

Crous, H. 2009a. National Policy on the Thermal Treatment of General and Hazardous Waste.(March)

Crous, H. 2009a. 关于热处理普通废物与危险废物的国家政策. (三月)

Crous, H. 2009b. National Policy Development Process for high Temperature Waste Incineration and AFR Co-Processing in Cement Production Final Comments and Response Report, Report No. CKAF0203V4. (September).

Crous, H. 2009b. 关于高温废物焚化与水泥生产过程协同处置 AFR 的国家政策制定过程的最终评论与反馈报告. 报告编码 CKAF0203V4 (九月) .

Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra). 2007. Mechanical Biological Treatment of Municipal Solid Waste. Available at

archive.defra.gov.uk/environment/waste/residual/newtech/.../mbt.pdf

环境、食品与农村事务部 (Defra) . 2007. 城市固体废弃物的机械生物处理. 网址: [www.archive.defra.gov.uk/environment/waste/residual/newtech/.../mbt.pdf](http://archive.defra.gov.uk/environment/waste/residual/newtech/.../mbt.pdf)

DoppstadtUS. 2012. Trommel screen. Available at

<http://www.doppstadtus.com/index.php?section=SM514&showFeatures=yes>

DoppstadtUS. 2012. 滚筒筛. 网址:

<http://www.doppstadtus.com/index.php?section=SM514&showFeatures=yes>

EIPPCB (European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau). 2010. Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries. European Commission. May. Available at <http://eippcb.jrc.es/reference/cl.html>

EIPPCB (欧盟综合污染防控局) .2010. 关于水泥、石灰与氧化镁制造行业最佳可行技术的参考文件. 欧盟委员会. 五月. 网址: <http://eippcb.jrc.es/reference/cl.html>

EIPPCB (European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau). 2006. Reference Document on Best Available Techniques for the Waste Treatment Industries. European Commission. August. Available at <http://eippcb.jrc.es/reference/wt.html>

EIPPCB (欧盟综合污染防控局) . 2006. 关于废物处理行业最佳可行技术的参考文件. 欧盟委员会. 八月. 网址: <http://eippcb.jrc.es/reference/wt.html>

Eunomia Research & Consulting. 2011. "Costs for Municipal Waste Management in the EU." Available at: <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/eucostwaste.pdf> Accessed on April 13, 2012.

Eunomia 研究与咨询. 2011. "欧盟城市固体废弃物管理成本". 网址:

<http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/eucostwaste.pdf> 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日

Environmental Protection Agency Victoria (EPA Victoria). 2011. Environmental License: Boral Cement Limited, EM30625. Aug. 24, 2011.

维多利亚州环保局 (EPA Victoria) . 2011. 环境许可证: 博罗水泥公司, EM30625. 2011 年 8 月 24 日.

European Commission. 2004. Sustainability Impact Assessment (SIA) Methodology: Towards an upgrade in 2004. SIA Methodology: Consultation Paper. D.-G. f. Trade. Brussels, EC. Available at trade.ec.europa.eu/consultations/documents/consul_114.pdf

欧盟委员会. 2004. 可持续性影响评估 (SIA) 方法: 2004年升级之路. SIA方法. 咨询文件. D.-G. f. Trade. Brussels, EC. 网址: rade.ec.europa.eu/consultations/documents/consul_114.pdf

European Commission (EC). 2006a. "Commission decision of 20/II/2006 laying down a questionnaire to be used for reporting on the implementation of Directive 2000/76/EC on the incineration of waste." Brussels, Belgium.

欧盟委员会 (EC) . 2006a. "委员会 20/II/2006 关于制定问卷用于上报 2000/76/EC 废物焚化指令实施情况的决议".布鲁塞尔. 比利时.

European Commission (EC). 2006b. "Reference Document on Best Available Techniques for Waste Treatment Industries." Available at: http://eippcb.jrc.es/reference/BREF/wt_bref_0806.pdf Access on April 13, 2012

欧盟委员会 (EC) . 2006b. "关于废物处理行业最佳可行技术的参考文件". 网址:
http://eippcb.jrc.es/reference/BREF/wt_bref_0806.pdf 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日.

European Commission (EC). 2006c. "Reference Document on Best Available Techniques for Waste Incineration." Available at: http://eippcb.jrc.es/reference/BREF/wi_bref_0806.pdf Access on April 13, 2012

欧盟委员会 (EC) . 2006c. "关于废物焚化最佳可行技术的参考文件". 网址:
http://eippcb.jrc.es/reference/BREF/wi_bref_0806.pdf 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日.

European Commission (EC). 2009. "Assessing Legal Compliance With and Implementation of the Waste Acceptance Criteria and Procedures by the EU-15." Available at:
http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/report_wac.pdf Access on April 13, 2012

欧盟委员会 (EC) . 2009. "评估欧盟十五国遵守与执行废物接收标准与流程". 网址:
http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/report_wac.pdf 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日.

European Commission (EC). 2010. "Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime, and Magnesium Oxide Manufacturing Industries." Available at:
http://eippcb.jrc.es/reference/BREF/clm_bref_0510.pdf Access on April 13, 2012

欧盟委员会 (EC) . 2010. "关于水泥、石灰与氧化镁制造行业最佳可行技术的参考文件". 网址: http://eippcb.jrc.es/reference/BREF/clm_bref_0510.pdf 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日.

European Commission (EC). 2011a. "Waste Incineration." Available at:
http://europa.eu/legislation_summaries/environment/waste_management/l28072_en.htm
Accessed on April 13, 2012

欧盟委员会 (EC) . 2011a. "废物焚化". 网址:
http://europa.eu/legislation_summaries/environment/waste_management/l28072_en.htm
最后查看日期 2012 年 4 月 13 日

European Commission (EC). 2011b. "Integrated Pollution Prevention and Control (until 2013)." Available at:
http://europa.eu/legislation_summaries/environment/waste_management/l28045_en.htm
Accessed on April 13, 2012

欧盟委员会 (EC) . 2011b. "综合污染防控 (截至 2013) ". 网址:
http://europa.eu/legislation_summaries/environment/waste_management/l28045_en.htm.
最后查看日期 2012 年 4 月 13 日

European Commission (EC). 2011c. "Industrial Emissions." Available at:

http://europa.eu/legislation_summaries/environment/air_pollution/ev0027_en.htm Accessed on April 13, 2012

欧盟委员会 (EC) . 2011c. "工业排放". 网址:

http://europa.eu/legislation_summaries/environment/air_pollution/ev0027_en.htm 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日

European Commission (EC). 2012a. "Directive 2008/98/EC on waste (Waste Framework Directive)." Available at: <http://ec.europa.eu/environment/waste/framework/index.htm> Accessed on April 13, 2012

欧盟委员会 (EC) . 2012a. "2008/98/EC 号废物指令 (废物框架指令) ". 网址:

<http://ec.europa.eu/environment/waste/framework/index.htm> 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日

European Commission (EC). 2012b. "Landfill of Waste." Available at:

http://ec.europa.eu/environment/waste/landfill_index.htm Access on April 13, 2012

欧盟委员会 (EC) . 2012b. "废物掩埋". 网址:

http://ec.europa.eu/environment/waste/landfill_index.htm 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日

European Commission (EC). 2012c. "The Waste Incineration Directive." Available at:

<http://ec.europa.eu/environment/air/pollutants/stationary/wid/legislation.htm> Access on April 13, 2012

欧盟委员会 (EC) . 2012c. "废物焚化指令". 网址:

<http://ec.europa.eu/environment/air/pollutants/stationary/wid/legislation.htm> 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日

European Commission (EC). 2012d. "The Industrial Emissions Directive." Available at:

<http://ec.europa.eu/environment/air/pollutants/stationary/ied/legislation.htm> Access on April 13, 2012

欧盟委员会 (EC) . 2012d. "工业排放指令". 网址:

<http://ec.europa.eu/environment/air/pollutants/stationary/ied/legislation.htm> 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日

European Commission (EC). 2012e. "Frequently Asked Questions Concerning Permitting". Available at:

<http://ec.europa.eu/environment/waste/framework/pdf/FAQs/FAQ%20Permitting.pdf>
Accessed on April 13, 2012

欧盟委员会 (EC) . 2012e. "许可证的常见问题". 网址:

<http://ec.europa.eu/environment/waste/framework/pdf/FAQs/FAQ%20Permitting.pdf> 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日

European Environment Agency. 2009. "Diverting Waste from Landfill: Effectiveness of Waste

Management Policies in the European Union." Available at:

http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/documents/Landfill_Directive_Report.pdf Accessed on April 13, 2012

欧洲环境局. 2009. "改变废物掩埋现状: 欧盟废物管理政策的有效性". 网址:

http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/documents/Landfill_Directive_Report.pdf 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日

European Pollutant Release and Transfer Register (E-PRTR). 2011. Available at:

<http://prtr.ec.europa.eu/> Access on April 13, 2012

欧盟污染物释放与转移登记系统（E-PRTR）. 网址：<http://prtr.ec.europa.eu/> 最后查看日期 2012

年 4 月 13 日

European IPPC Bureau. 2003. Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on the General Principles of Monitoring (July 2003). European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies. Seville. Available from ftp://ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/mon_bref_0703.pdf [Accessed 19 August 2009]

欧盟综合污染防控局. 2003. 综合污染防控, 关于监测基本原则的参考文件 (2003 年 7 月) . 欧盟委员会, 联合研究中心, 未来技术研究所. 塞维利亚. 网址:

ftp://ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/mon_bref_0703.pdf 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日

European Union Network for the Implantation and Enforcement of Environmental Law (IMPEL Network). 1998. "IMPEL Workshop on Licensing and Enforcement Practices in Cement Plants Using Alternative Fuels." Carinthia, Austria.

欧盟环境法宣传与执行网络 (IMPEL 网络) . 1998. "IMPEL 关于使用替代燃料的水泥厂的许可证制度与政策落实研讨会". 卡林西亚. 奥地利.

Fitzgerald, G. and N. Themelis. 2009. "Technical and Economic Impacts of Pre-shredding the MSW Feed to Moving Grate WTE Boilers." Proceedings of the 17th Annual North American Waste-to-Energy Conference NAWTEC17, Chantilly, Virginia, USA. May 18-20.

Fitzgerald, G. 与 N. Themelis. 2009. "移动炉篦 WTE 锅炉 MSW 进料预破碎的技术与经济影响". 第十七届北美洲废物变能源大会议程 NAWTEC17. 尚蒂伊. 弗吉尼亚. 美国. 五月 18-20

Flaga, A. no date. Sludge drying. Institute of Heat Engineering and Air Protection, Cracow University of Technology, Poland. Available at www2.lwr.kth.se/forskningsprojekt/.../Flagasludgedrying73.pdf

Flaga, A. 无日期. 污泥干化. 热力工程与空气保护研究所. 克拉科夫工业大学. 波兰. 网址: www2.lwr.kth.se/forskningsprojekt/.../Flagasludgedrying73.pdf

FLSmidth. 2011. HOTDISC™ Combustion Device. Available at <http://www.flsmidth.com/en-US/Products/Product+Index/All+Products/Cement+Burning/Hotdisc/Hotdisc>

FLSmidth. 2011. HOTDISC™ 燃烧装置. 网址: <http://www.flsmidth.com/en-US/Products/Product+Index/All+Products/Cement+Burning/Hotdisc/Hotdisc>

Fytili, D. and A. Zabaniotou. 2008. "Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review." Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 12, Issue 1, January, pp. 116–140.

Fytili, D. 与 A. Zabaniotou. 2008. "欧盟利用污泥的新方法与旧方法——回顾". 可再生与可持续能源回顾. 第 12 卷. 第 1 期. 一月. 第 116-140 页

Gendebien, A., A. Leavens, K. Blackmore, A. Godley, K. Lewin, K.J. Whiting, R. Davis, J. Giegrich, H. Fehrenbach, U. Gromke, N. del Bufalo, and D. Hogg. 2003. "Refuse Derived Fuel, Current Practice and Perspectives: Final Report." WRc Ref: CO5087-4.

Gendebien、A., A. Leavens、K. Blackmore、A. Godley、K. Lewin、K.J. Whiting、R. Davis、J. Giegrich、H. Fehrenbach、U. Gromke、N. del Bufalo 与 D. Hogg. 2003. "废物衍生燃料, 现行实践与未来: 最终报告". WRc Ref: CO5087-4.

Genon, G. and E. Brizio. 2008. "Perspectives and limits for cement kilns as a destination for RDF." Waste Management 28 (2008): 2375–2385.

Genon, G. 与 E. Brizio. 2008. "水泥窑利用废物衍生燃料的前景与局限". 废物管理 28 (2008) : 2375-2385.

- GTZ/Holcim. 2008. Training Kit on Co-Processing Waste Materials in Cement Production- Brochure. Available at <http://www.coprocem.org/>
- GTZ/Holcim. 2008. 水泥制造过程协同处置废弃材料的培训手册. 网址: <http://www.coprocem.org/>
- GTZ/Holcim. 2006. Guidelines on Co-Processing Waste Materials in Cement Production. Available at <http://www.coprocem.org/>
- GTZ/Holcim. 2006. 水泥制造过程协同处置废弃材料指南. 网址: <http://www.coprocem.org/>
- GTZ/Holcim. 2010. Exploring Co-processing as an Option for disposal of certain fractions of Municipal Solid Waste- Workshop Report. India. Available at www.hrdp-net.in/live/hrdpmp/.../wkshpreportcoprocessing.pdf
- GTZ/Holcim. 2010. 探索协同处置作为部分城市固体废弃物处置选项的可行性——研讨会报告. 印度. 网址: www.hrdp-net.in/live/hrdpmp/.../wkshpreportcoprocessing.pdf
- Global Environmental Center Foundation. 2005. Eco-towns in Japan: Implications for and Lessons for Developing Countries and Cities. June.
- 全球环境中心基金会. 2005. 日本的生态城: 对于发展中国家与城市的启示. 六月.
- Gorgun E., and G. Insel. 2007. "Cost evaluation of sludge treatment options and energy recovery from wastewater treatment plant sludge treating leather tanning wastewaters." Journal of Leather Science, No. 1, 2007, s. 17-20.
- Gorgun E., 与 G. Insel. 2007. “污泥处理以及从废水处理厂处理的皮革鞣制废水中回收能源所需的成本预估” 皮革科学周刊. 第一期. 2007, s. 17-20.
- Greer, W.L. 2003. Interactions Among Gaseous Pollutants from Cement Manufacture and Their Control Technologies. R&D Serial No. 2728. Skokie, Illinois, USA: Portland Cement Association. Available at www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd24/among.pdf
- Greer, W.L. 2003. 水泥生产过程所产生的气体污染物之间的反应以及他们的控制技术. 研发序列号 2728. Skokie. 伊利诺伊斯, 美国: 硅酸盐水泥协会. 网址: www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd24/among.pdf
- Hall, J. 1999. "Ecological and economical balance for sludge management options." Proceedings of the workshop on Problems around sludge, 18-19 November, Stresa (Italy). Available at ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/workshoppart4.pdf
- Hall, J. 1999. "污泥管理的生态与经济平衡". 污泥相关问题研讨会议程, 11 月 18-19 日, 斯特雷萨 (意大利) . 网址: ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/workshoppart4.pdf
- Hand, A. 2007. Technology Options for the Cement Industry with the Use of Alternative Fuels. KHD Humboldt Wedag GmbH. Alf-Cemind Workshop, Athens, Greece. May 16. Available at alf-cemind.com/docs/presentations/KHD%20presentation.pdf
- Hand, A. 2007. 使用替代燃料的水泥行业的技术选项. KHD Humboldt Wedag GmbH. Alf-Cemind 研讨会, 雅典, 希腊. 五月 16 日. 网址: alf-cemind.com/docs/presentations/KHD%20presentation.pdf
- Hanjie, Z. 2010. Sludge treatment to increase biogas production. Available at www.sjostadsverket.se/download/18.../LWR_EX_10_20.pdf
- Hanjie, Z. 2010. 污泥处理以增加生物气体产量. 网址: www.sjostadsverket.se/download/18.../LWR_EX_10_20.pdf
- Hashimoto, S., T. Fujita, Y. Ceng, and E. Nagasawa. 2010. "Realizing CO₂ emission reduction through industrial symbiosis: a cement production case study for Kawasaki." Resources, Conservation and Recycling (54)" pp. 704-710.

- Hashimoto、S., T. Fujita、Y. Ceng 与 E. Nagasawa. 2010. “通过行业共生减少 CO₂ 排放量：川崎市水泥生产案例研究”. 资源、保护与循环(54). 第.704 页-710 页.
- He, P. J., F. Lü, H. Zhang, L.M. Shao, D.J. Lee. 2007. “Sewage Sludge in China: Challenges Toward a Sustainable Future.” Water Practice & Technology. doi10.2166/wpt.2007.083
- He, P. J., F. Lü, H. Zhang, L.M. Shao, D.J. Lee. 2007. “污泥在中国：构建可持续未来所面临的挑战”. 水实践&技术. doi10.2166/wpt.2007.083
- HeidelbergCement. 2011. Potential of PAD to further improve CO₂ efficient sewage sludge recovery in cement kilns. BioValor Symposium, Arnhem, the Netherlands. June. Available at www.biovalor-europe.com/cms-assets/.../24887-463932.theulen.pdf
- HeidelbergCement. 2011. PAD 具有进一步提高水泥窑税后污泥的 CO₂ 排放效率. BioValor 专题报告会, 阿纳姆, 荷兰. 六月. 网址: www.biovalor-europe.com/cms-assets/.../24887-463932.theulen.pdf
- Hempel, C. 2011. “Cement plant upgrade to reduce the primary (fossil) fuel consumption.” In Proceedings of 7th Green Cementech, Hyderabad, India. May.
- Hempel, C. 2011. “水泥厂升级以减少主要化石燃料消耗”. 第七次绿色水泥科技大会议程. 海得拉巴, 印度. 五月.
- Hock, U. 2008. “System technology for the use of alternative fuels for kiln firing in the cement industry.” In Proceedings of ASEAN Federation of Cement Manufacturers (AFCM)’s 21st technical symposium and exhibition. Bangkok, Thailand.
- Hock, U. 2008. “水泥行业使用替代燃料作为窑炉加热能源的系统技术”. 东盟水泥制造商联盟第 21 次技术研讨会与展览之议程. 曼谷, 泰国.
- Hotta, Y. and C. Aoki-Suzuki. 2010. Selected Case Studies of Integrated Waste Management and the 3Rs at Local Level in Japan – Yokohama and Kamakura. http://www.iges.or.jp/en/wmr/pdf/activity20101007/6_Hotta.pdf
- Hotta, Y. 与 C. Aoki-Suzuki. 2010. 综合废物管理与日本地方层级 3Rs 的精选案例研究——横滨与神奈川. http://www.iges.or.jp/en/wmr/pdf/activity20101007/6_Hotta.pdf
- Inter-American Development Bank. 2010. Cement Manufacturing Plant Guidelines: An Approach to Reconciling the Financing of Cement Manufacturing Plants with Climate Change Objectives. August. <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=35601768>
- 美洲开发银行. 2010. 水泥制造厂指南：协调水泥制造厂融资与气候变化目标的方法. 八月. <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=35601768>
- Institute for Prospective Technological Studies (IPTS). 1999. “The Incineration of Waste in Europe: Issues and Perspectives.” March.
- 未来技术研究所 (IPTS) . 1999. “欧洲的废物焚化：问题与前景”. 三月.
- IWA Water Wiki, 2011. China Overview. Available at <http://www.iwawaterwiki.org/xwiki/bin/view/Articles/China>
- 国际水协会, 2011. 中国概览. 网址: <http://www.iwawaterwiki.org/xwiki/bin/view/Articles/China>
- Japan Cement Association. 2010. Waste Material Used in Cement Industry. Available at <http://www.jcassoc.or.jp/cement/2eng/eh3.html>
- 日本水泥协会. 2010. 水泥行业所使用的废弃材料. 网址: <http://www.jcassoc.or.jp/cement/2eng/eh3.html>
- Jensen, L.S. 2008. “Complete alternative fuel solution for cement kilns.” In Proceedings of ASEAN Federation of Cement Manufacturers (AFCM)’s 21st technical symposium and exhibition. Bangkok, Thailand.

- Jensen, L.S. 2008. “水泥行业全方位替代燃料方案”. 东盟水泥制造商联盟第 21 次技术研讨会与展览之议程. 曼谷, 泰国.
- K2BW. 2012. Continuous Emission Monitoring Systems. Available at
<http://www.k2bw.com/continuousemissionmonitor.htm>
- K2BW. 2012. 持续烟气排放检测系统. 网址:
<http://www.k2bw.com/continuousemissionmonitor.htm>
- Karstensen, K. H. 2008. Formation, release and control of dioxins in cement kilns - A review. Chemosphere, 70 (2008): 543–560.
- Karstensen, K. H. 2008. 水泥窑内二恶英的形成、释放与控制——回顾. 臭氧层, 70 (2008) : 543-560
- Karstensen, K.H. 2007a. A Literature Review on Co-processing of Alternative Fuels and Raw Materials and Hazardous Wastes in Cement Kilns. Available at
<http://www.environment.gov.za/PolLeg/GenPolicy/2008Sep25/cement.html>
- Karstensen, K.H. 2007a. 水泥窑协同处置替代燃料、原材料与危险废物的文献评论. 网址:
<http://www.environment.gov.za/PolLeg/GenPolicy/2008Sep25/cement.html>
- Karstensen, K.H. 2007b. Cement Production Technology in South Africa and an Evaluation of Their Ability to Co-Process AFRs and Treat Hazardous Wastes. Report No. 66011-xx (November). Co-processing occurs at a small number of plants in South Africa currently, but is limited to aluminum processing wastes.
- Karstensen, K.H. 2007b. 南非水泥生产技术与南非水厂协同处置 AFR 及危险废物的能力评估. 报告编码 66011-xx (十一月). 南非目前仅有少数工厂进行废物协同处置, 但仅限于铝加工后剩余的废料.
- Karstensen K.H. 2006. Formation and Release of POPs in the Cement Industry. Second edition. World Business Council for Sustainable Development/SINTEF.
- Karstensen K.H. 2006. 水泥行业持久性有机污染物的形成与释放. 第二版. 世界企业永续发展委员会/SINTEF
- Kihara, Y. 2012. Associação Brasileira de Cimento Portland. Personal Communication. March.
- Kihara, Y. 2012. 巴西硅酸盐水泥协会. 私人通信. 三月
- Kolyfetis, E. 2007. “Alternative Fuels & Raw Materials in Halyps cement.” Italcementi Group. Proceedings of the workshop on Alternative Fuels & Alternative Raw Materials in the Cement Industry. Athens, Greece, May 16. Available at <http://www.alf-cemind.com/publications.html>
- Kolyfetis, E. 2007. “Halyps 水泥公司的替代燃料与原材料”. Italcementi Group. 水泥行业替代燃料与原材料研讨会议程. 雅典, 希腊, 5 月 16 日. 网址: <http://www.alf-cemind.com/publications.html>
- Leong, C.C. 2008. “Solid fuel feed optimization-towards multi-fuel system.” In the Proceedings of ASEAN Federation of Cement Manufacturers (AFCM)’s 21st technical symposium and exhibition. Bangkok, Thailand.
- Leong, C.C. 2008. “固体燃料喂料优化——迈向多燃料系统”. 东盟水泥制造商联盟第 21 次技术研讨会与展览之议程. 曼谷, 泰国.
- Maringolo, V. 2007. “Use of waste-derived fuels and materials in the Brazilian cement industry,” Global Fuels Magazine (June); pp. 33-34.
- Maringolo, V. 2007. “巴西水泥行业使用废物衍生燃料与原料”. 环球燃料杂志 (七月) ; 第 33 页-34 页.

- McCarthy, J.E. (coordinator). 2005. "Clean Air Act: A Summary of the Act and Its Major Requirements." Available at: <http://fpc.state.gov/documents/organization/47810.pdf> Accessed on April 13, 2012
- McCarthy, J.E. (调解员). 2005. "清洁空气法：法令总述及其主要要求". 网址：
<http://fpc.state.gov/documents/organization/47810.pdf> 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日.
- McIlveen-Wright, D. R., Y. Huang, S. Rezvani, Y. Wang. 2007. "A technical and environmental analysis of co-combustion of coal and biomass in fluidised bed technologies." *Fuel* 86(14): 2032-2042.
- McIlveen-Wright, D. R., Y. Huang, S. Rezvani, Y. Wang. 2007. "流体床技术煤炭与生物质共同燃烧的技术与环境分析". *燃料* 86(14): 2032-2042.
- McGrath, B. 2012. Technical Manager, Boral Cement. Personal Communication. April.
- McGrath, B. 2012. 技术经理, 博罗水泥. 私人通信. 四月.
- Memon, M.A. no date. "Integrated Solid Waste Management." Presentation at the International Environmental Technology Center. Osaka, Japan.
- Memon, M.A. 无日期. "综合固体废物管理". 在国际环境基础中心的讲演. 大阪, 日本.
- Milieu Law & Policy Consulting Ltd (Milieu). 2011. "Provisions on Penalties Related to Legislation on Industrial Installations: Document on Good Practices." October. Brussels, Belgium.
- Milieu 法律&政策咨询公司 (Milieu) . 2011. "关于工业设施法律惩罚的规定: 有关良好执业的文件". 十月. 布鲁塞尔, 比利时.
- Milieu Ltd, WRc and RPA. 2008. Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land Final Report Part I: Overview Report. Available at ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/part_i_report.pdf
- Milieu Ltd, WRc and RPA. 2008. 关于污泥复归于土的环境、经济与社会影响的最终报告, 第一部分: 概览. 网址: ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/part_i_report.pdf
- Mineral Production Association Cement (MPA Cement). 2009. Performance 2008: a sector plan report from the UK cement industry. Available at http://cement.mineralproducts.org/documents/MPAC_Performance_2008.pdf
- 矿物生产协会水泥 (MPA Cement). 2009. 性能 2008: 英国水泥行业领域规划报告. 网址:
http://cement.mineralproducts.org/documents/MPAC_Performance_2008.pdf
- Mokrzycki, E., A. Uliasz-Bochenczyk, M. Sarna. 2003. "Use of alternative fuels in the Polish cement industry." *Applied Energy* 74(1-2): 101-111.
- Mokrzycki, E., A. Uliasz-Bochenczyk, M. Sarna. 2003. "波兰水泥行业使用替代燃料". 应用能源 74(1-2): 101-111.
- Murray, A. and L. Price. 2008. Use of Alternative Fuels in Cement Manufacture: Analysis of Fuel Characteristics and Feasibility for Use in the Chinese Cement Sector. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, U.S. Department of Energy. Available at <http://china.lbl.gov/publications/use-alternative-fuels-cement-manufacture-analysis-fuel-characteristics-and-feasibility->
- Murray, A. 与 L. Price. 2008. 水泥生产使用替代燃料: 燃料特性分析以及用于中国水泥行业的可行性分析. 劳伦斯伯克利国家实验室. 美国能源部. 网址:
<http://china.lbl.gov/publications/use-alternative-fuels-cement-manufacture-analysis-fuel-characteristics-and-feasibility->
- Nakamura, Y. 2007. "Waste Management and Recycling Business in the United States and Japan" USJP Occasional Paper 07-09. Cambridge MA: Harvard University.

- Nakamura, Y. 2007.“美国与日本的废物管理及回收业务”. 美日论文丛刊 07-09. 马塞诸塞州剑桥市：哈佛大学.
- National Bureau of Statistics (NBS). 2005-2011. China Energy Statistical Yearbook (various years). Beijing: China Statistics Press.
- 国家统计局（NBS）. 2005-2011. 中国能源统计年鉴（多个年份）. 北京：中国统计出版社.
- Nithikul, J. 2007. Potential of refused derived fuel production from Bangkok municipal solid waste. Masters of Engineering thesis. Available at
www.faculty.ait.ac.th/visu/Data/.../Jidapa%20Thesis%2012-12-07.pdf
- Nithikul, J. 2007. 曼谷城市固体废弃物用于生产废物衍生燃料的潜力. 网址：
www.faculty.ait.ac.th/visu/Data/.../Jidapa%20Thesis%2012-12-07.pdf
- Onaka, T. 2000. “Sewage can make Portland cement: a new technology for ultimate reuse of sewage sludge.” Water Science and Technology Vol. 41 No 8, pp 93–98.
- Onaka, T. 2000. “污泥可制硅酸盐水泥：一门再利用污泥的新技术”. 水科学与技术. 卷 41. 第 8 号, 第 93 页-98 页.
- Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). 2010. OECD Environmental Performance Reviews: Japan 2010.
- 经济合作与发展组织（OECD）. 2010. OECD 环境表现回顾：日本 2010.
- Ozaki, M., A. Miyamoto. 2007. “Utilization of Melt-solidified Slag from Sewage Sludge as Construction Material.” Available at: <http://www.pwri.go.jp/eng/activity/pdf/reports/ozaki.070603.pdf> Accessed on April 12, 2012
- Ozaki, M., A. Miyamoto. 2007. “利用污泥的融化固化熔渣作为建筑材料”. 网址：
<http://www.pwri.go.jp/eng/activity/pdf/reports/ozaki.070603.pdf> 最后查看日期 2012 年 4 月 12 日.
- Peltier, R. 2003. “Mercury removal standards are coming. Where's the technology?” Power 147(4): 40.
- Peltier, R. 2003. “脱汞标准要实行了. 技术又在哪？” Power 147(4): 40.
- Portland Cement Association (PCA). 2012. Cement and Concrete Basics: Manufacture of Portland Cement. Available at http://www.cement.org/basics/concretebasics_history.asp
- 硅酸盐水泥协会（PCA）. 2012. 水泥与混凝土基础：硅酸盐水泥的制造. 网址：
http://www.cement.org/basics/concretebasics_history.asp
- Reinhard, J.D. 2008. “Preparing and handling of RDF for the cement industry.” In Proceedings of ASEAN Federation of Cement Manufacturers (AFCM)’s 21st technical symposium and exhibition. Bangkok, Thailand.
- Reinhard, J.D. 2008. “水泥行业 RDF 的制作与装卸”. 东盟水泥制造商联盟第 21 次技术研讨会与展览之议程. 曼谷. 泰国.
- Reijnders, L. 2007. “The cement industry as a scavenger in industrial ecology and the management of hazardous substances.” Journal of Industrial Ecology 11(3): 15- 25.
- Reijnders, L. 2007. “水泥行业作为工业生态与危险物质管理的拾荒者”. 工业生态学杂志 11(3): 15- 25.
- Reimann, D.O. 1999. “Problems about sewage sludge incineration” Proceedings of the Workshop on Problems around Sludge. Stresa, Italy. November 18-19. Available at
ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/workshoppart4.pdf
- Reimann, D.O. 1999. “污泥焚化的相关问题”. 污泥问题研讨会议程. 斯特雷萨. 意大利. 11 月 18-19 日. 网址：ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/workshoppart4.pdf

- Rovira, J., M. Mari, M. Nadal, M. Schuhmacher, J.L. Domingo. 2011. "Use of sewage sludge as secondary fuel in a cement plant: human health risks." *Environment International* 37 (2011): 105–111.
- Rovira, J., M. Mari, M. Nadal, M. Schuhmacher, J.L. Domingo. 2011. "水泥厂使用污泥作为二次燃料：人体健康风险". *环境国际* 37 (2011): 105–111.
- Schneider, M, K. Kuhlmann, F. Söllenböhmer. 1996. "PCDD/F-Emissions from German Cement Clinker Kilns." *Organohalogen Compounds*, Volume 27.
- Schneider, M, K. Kuhlmann, F. Söllenböhmer. 1996. "德国水泥熟料窑的 PCDD/F 排放". *有机卤素化合物*, 卷 27.
- Schenck Process. 2009. FUEL – MASTER: Solutions for reliable feeding of alternative fuels. In *Proceedings of 5th Green Cementech*, Hyderabad, India. May.
- chenck Process. 2009. 燃料大师：替代燃料稳定给料的解决方案. 第五届绿色水泥科技大会议程. 海得拉巴. 印度. 五月.
- Schu, R. 2008. Low Temperature Drying as Key Technology for Waste Recycling. Second international Symposium on Energy from Biomass and Waste. Venice, Italy. Available at http://www.ecoenergy.de/go_public/freigegeben/Low_temperature_drying_R.Schu_Venice2008_Publication.pdf
- Schu, R. 2008. 低温干化作为废物回收的关键技术. 关于生物质与废物回收能源的第二次国际研讨会. 威尼斯. 意大利. 网址：
http://www.ecoenergy.de/go_public/freigegeben/Low_temperature_drying_R.Schu_Venice2008_Publication.pdf
- Schuhmacher, M., M. Nadal, J.L. Domingo. 2009. "Environmental monitoring of PCDD/Fs and metals in the vicinity of a cement plant after using sewage sludge as a secondary fuel." *Chemosphere*. Volume 74, Issue 11, March, pp. 1502–1508.
- Schuhmacher, M., M. Nadal, J.L. Domingo. 2009. "使用污泥作为二次燃料之后在水泥厂周边地区检测 PCDD/Fs 与金属释放". *臭氧层*. 卷 74. 第 11 期. 三月. 第 1502 页-1508 页.
- Seemann, A. 2007. "Co-incineration of Municipal Solid Waste in Cement Industry.: Proceedings of the International Conference on Sustainable Solid Waste Management, Chennai, India. September 5-7. pp. 348-355.
- Seemann, A. 2007. "水泥行业协同焚烧城市固体废弃物". 国际可持续固体废物管理大会议程, 陈奈, 印度. 9 月 5-7 日. 第 348 页-355 页.
- Shih, P., J. Chang, H. Lu, L. Chiang. 2005. "Reuse of heavy metal-containing sludge in cement production." *Cement and Concrete Research* 35(11): 2110-2115.
- Shih, P., J. Chang, H. Lu, L. Chiang. 2005. "水泥生产过程再利用含重金属成分的污泥". *水泥与混凝土研究* 35(11): 2110-2115.
- SICK Sensor Intelligence. No date. Presentation on continuous emission monitoring system for cement plants. Available at <http://www.sick.com>.
- SICK 传感智能. 无日期. 关于水泥厂安装持续烟气排放监测系统的讲演. 网址：
<http://www.sick.com>.
- South Africa Department of Environmental Affairs. 2009. National Environmental Management: Waste Act, 2008 (Act No. 59 of 2008) National Policy on Thermal Treatment of General and Hazardous Waste. 24 July 2009.
- 南非环境事务部. 2009. 国家环境管理: 废物法, 2008 (2008 年第 59 号法令) 关于热处理普通废物与危险废物的国家政策. 2009 年 7 月 24 日.

- Stantec, 2011. Waste to Energy: a Technical Review of Municipal Solid Waste Thermal Treatment Practices. Available at <http://www.bcbioenergy.com/resources/industry-resources/>
- Stantec, 2011. 废物变能源：城市固体废物热处理实践的技术回顾. 网址：
<http://www.bcbioenergy.com/resources/industry-resources/>
- Stasta, P., J. Boran, L. Bebar, P. Stehlík, J. Oral. 2006. "Thermal processing of sewage sludge." Applied Thermal Engineering 26 (2006): 1420–1426.
- Stasta, P., J. Boran, L. Bebar, P. Stehlík, J. Oral. 2006. "污泥热处理" 应用热力工程 26 (2006): 1420–1426.
- Stehlík P., P. Šasta, J. Borá, L. Houdková, V. Ucekaj, L. Bébar, M. Šarlej. No date. Waste as alternative fuel. Institute of Process and Environmental Engineering, Brno University of Technology, Czech Republic.. Available at www.cpi.umist.ac.uk/minent/.../VUT_Waste_as_alternative_fuel.pdf
- Stehlík P., P. Šasta, J. Borá, L. Houdková, V. Ucekaj, L. Bébar, M. Šarlej. 无日期. 废物作为替代燃料. 工艺与环境工程研究所, 布尔诺科技大学, 捷克共和国. 网址：
www.cpi.umist.ac.uk/minent/.../VUT_Waste_as_alternative_fuel.pdf
- Steiner, M., A. Montangero, D. Koné, M. Strauss. 2002. Economic aspects of low-cost faecal sludge management. Estimation of collection, haulage, treatment and disposal /reuse cost, EAWAG/SANDEC, Dübendorf, Switzerland. Available at
www.eawag.ch/forschung/sandec/.../ewm/dl/FSM_cost_report.pdf
- Steiner, M., A. Montangero, D. Koné, M. Strauss. 2002. 粪便污泥管理的经济层面. 收集、运输、处理与处置/再利用成本预估. EAWAG/SANDEC, 迪本多夫. 瑞士. 网址：
www.eawag.ch/forschung/sandec/.../ewm/dl/FSM_cost_report.pdf
- Stockholm Convention. 2006. Cement Kilns Firing Hazardous Waste - Draft 15. April 2006. Available at www.pops.int/documents/.../Book%206%20Cement%20Kilns.doc
- 斯德哥尔摩公约. 2006. 水泥窑焚烧危险废物——第 15 草案. 2006 年 4 月. 网址：
www.pops.int/documents/.../Book%206%20Cement%20Kilns.doc
- Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL). 2005. "Guidelines: Disposal of Wastes in Cement Plants." Updated Edition.
- 瑞士环境、森林与景观局 (ASEFL) . 2005. "指南：水泥厂处置废物". 更新版.
- Swiss Confederation. 2009. "National Reporting to CSD 18/19 by Switzerland: Waste Management". 瑞士联邦. 2009. "瑞士递交予联合国可持续发展委员会 18/19 的报告：废物管理".
- Taiheiyo Cement Company. 2006. Utilization of Municipal Solid Wastes in the Cement Manufacturing Process: Two Examples from Taiheiyo Cement Corporation. Presentation given at the IEA – Cement Energy Efficiency Workshop, Paris, Sept. 4-5.
- Taiheiyo 水泥公司. 2006. 水泥生产过程使用城市固体废弃物：来自 Taiheiyo 水泥公司的两个案例. 在国际能源局——水泥能源效率研讨会上所作的讲演. 巴黎. 9 月 4-5 日.
- Takx, A. 2002. Sewage sludge as a secondary fuel and raw material at ENCI. Available at
<http://www.eco-responsibility.nl/nl/artikelen/co-processing>
- Takx, A. 2002. ENCI 使用污泥作为二次燃料与原料. 网址：
<http://www.eco-responsibility.nl/nl/artikelen/co-processing>
- TA Luft (Technical Instructions on Air Quality Control). 2002. First General Administrative Regulation Pertaining the Federal Emission Control Act. Germany. Available at:
http://www.bmu.de/english/air_pollution_control/ta_luft/doc/36958.php Accessed on April 12, 2012

- TA Luft (空气质量控制技术指引). 2002. 关于联邦排放控制法的第一个常规行政规范. 德国. 网址: http://www.bmu.de/english/air_pollution_control/ta_luft/doc/36958.php 最后查看日期 2012 年 4 月 12 日
- Taruya, T., N. Okuno, K. Kanaya. 2002. Reuse of sewage sludge as raw material of Portland cement in Japan. *Water Science and Technology*, 46 (10) (2002): 255–258
- Taruya, T., N. Okuno, K. Kanaya. 2002. 再利用污泥作为日本硅酸盐水泥的原料. 水科学与技术, 46 (10) (2002): 255–258
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). 2010. Dehydration and incineration of sewage sludge in Singapore. CDM project design document. Available at <http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/JCI1255679005.07>
- 联合国气候变化框架公约 (UNFCCC). 2010. 新加坡的污泥脱水与焚化. CDM 项目设计文件. 网址: <http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/JCI1255679005.07>
- United Nations Environment Programme (UNEP). 2007. Guidelines on Best Available Techniques and Provisional Guidance on Best Environmental Practices Relevant to Article 5 and Annex C of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants: Cement Kilns Firing Hazardous Waste. Geneva, Switzerland: UNEP.
- 联合国环境计划 (UNEP). 2007. 关于斯德哥尔摩持久性有机污染物公约第 5 条与附录 C 的最佳可行技术指南以及最佳环境实践的试行指引: 水泥窑焚烧危险废物. 日内瓦, 瑞士: UNEP.
- United Nations Environment Programme (UNEP) Chemicals. 2005. Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furane Releases. Geneva, Switzerland. Available at www.chem.unep.ch/pops/pcdd_activities/toolkit/.../Toolkit_2003.pdf
- 联合国环境计划 (UNEP) --化学物. 2005. 鉴定与量化二恶英及呋喃的标准化工具箱. 日内瓦, 瑞士. 网址: www.chem.unep.ch/pops/pcdd_activities/toolkit/.../Toolkit_2003.pdf
- Unitherm Cemcon. 2012. Pneumo Injector V2 for solid alternative fuels. Available at http://www.unitherm.co.at/en/pneumo_injector_v2.html
- Unitherm Cemcon. 2012. 用于固体替代燃料的气动注射器 V2. 网址: http://www.unitherm.co.at/en/pneumo_injector_v2.html
- U.K. Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra). 2006. "Implementation on Directive 2000/76/EC within the United Kingdom."
- 英国环境、食品与农村事务部 (Defra). 2006. "2000/76/EC 指令在英国的执行情况".
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2005. "National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants: Final Standards for Hazardous Air Pollutants for Hazardous Waste Combustors." Available at: <http://www.epa.gov/osw/laws-regulations/state/revision/frs/fr212.pdf> Access on April 13, 2012
- 美国环保局 (EPA). 2005. "危险大气污染物国家排放标准: 危险废物焚烧炉之危险大气污染物的最终标准". 网址: <http://www.epa.gov/osw/laws-regulations/state/revision/frs/fr212.pdf> 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2008. "Cement Sector Trends in Beneficial Use of Alternative Fuels and Raw Materials (Revised Draft)." Available at: <http://www.epa.gov/sectors/pdf/cement-sector-report.pdf> Access on April 13, 2012
- 美国环保局 (EPA). 2008. "水泥行业有效利用替代燃料与原料的趋势 (草稿修订版)". 网址: <http://www.epa.gov/sectors/pdf/cement-sector-report.pdf> 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2009. "U.S. Environmental Protection Agency - October 2007 FY08 – FY10 Compliance and Enforcement National Priority: Clean Air Act, New Source Review/Prevention of Significant Deterioration." Available at:
<http://www.epa.gov/compliance/resources/publications/data/planning/priorities/fy2008prioritiescaansrpsd.pdf> Access on April 13, 2012

美国环保局（EPA）. 2009. “美国环保局—2007 年 10 月 FY08—FY10 优先遵守与执行的国家法令：清洁空气法以及新的重大恶化污染源审查/预防法”. 网址：
<http://www.epa.gov/compliance/resources/publications/data/planning/priorities/fy2008prioritiescaansrpsd.pdf> 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2010. "CAA Statute, Regulations, & Enforcement." Available at: <http://www.epa.gov/compliance/civil/caa/caaenfstatreq.html> Access on April 13, 2012

美国环保局（EPA）. 2010. “清洁空气法的立法、规范与执行”. 网址：
<http://www.epa.gov/compliance/civil/caa/caaenfstatreq.html> 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2011a. "National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)." Available at: <http://www.epa.gov/air/criteria.html> Access on April 13, 2012
美国环保局（EPA）. 2011a. “国家环境空气质量标准（NAAQS）”. 网址：
<http://www.epa.gov/air/criteria.html> 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2011b. "Taking Toxics Out of the Air." Available at:
<http://www.epa.gov/air/toxicair/takingtoxics/p1.html#7> Access on April 13, 2012

美国环保局（EPA）. 2011b. “清除空气内的有毒物质”. 网址：
<http://www.epa.gov/air/toxicair/takingtoxics/p1.html#7> 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2011c. "Standards of Performance for New Stationary Sources and Emission Guidelines for Existing Source: Commercial and Industrial Solid Waste Incineration Unit." Available at: <http://www.epa.gov/ttn/atw/129/ciwi/fr21mr11.pdf> Access on April 13, 2012

美国环保局（EPA）. 2011c. “新固定污染源性能标准以及现有污染源排放指南：商业与工业固体垃圾焚化单位”. 网址: <http://www.epa.gov/ttn/atw/129/ciwi/fr21mr11.pdf> 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2011d. "Industrial, Commercial, and Institutional Boilers and Process Heaters and Commercial and Industrial Solid Waste Incineration Units:Final rules; Delay of effective dates." Available at: <http://www.epa.gov/ttn/atw/boiler/fr18my11.pdf> Access on April 13, 2012

美国环保局（EPA）. 2011d. “工业、商业与事业锅炉与过程加热器以及工商业固体废物焚化单位：最终规则；生效日期延缓”. 网址: <http://www.epa.gov/ttn/atw/boiler/fr18my11.pdf> 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2011e. "Commercial and Industrial Solid Waste Incineration Units: Reconsideration and Proposed Amendments; Non-Hazardous Secondary Materials That Are Solid Waste; Proposed Rule." Available at:
<http://www.epa.gov/ttn/atw/129/ciwi/fr23de11.pdf> Access on April 13, 2012

美国环保局（EPA）. 2011e. “商业与工业固体废弃物焚化单位：再考量与拟议修正案；固体废弃物等非危险二次材料；拟议规则”. 网址：
<http://www.epa.gov/ttn/atw/129/ciwi/fr23de11.pdf> 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日

- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2011f. "CAA National Enforcement Programs: MACT Air Toxics Enforcement." Available at:
<http://www.epa.gov/compliance/civil/caa/caaenfprog.html#MACT> Access on April 13, 2012
美国环保局（EPA）. 2011f. "清洁空气法国家执行计划：MACT 空气有毒物质实施". 网址：
<http://www.epa.gov/compliance/civil/caa/caaenfprog.html#MACT> 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2011g. "Cement Manufacturing Enforcement Initiative." Available at: <http://www.epa.gov/compliance/civil/caa/cement/index.html> Access on April 13, 2012
美国环保局（EPA）. 2011g. "水泥生产实施计划". 网址：
<http://www.epa.gov/compliance/civil/caa/cement/index.html> 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2011h. "National Enforcement Initiatives for Fiscal Years 2008 - 2010: Clean Air Act: New Source Review/Prevention of Significant Deterioration." Available at: <http://www.epa.gov/compliance/data/planning/priorities/caansrpsd.html> Access on April 13, 2012
美国环保局（EPA）. 2011h. "2008-2010 财年国家实施计划：清洁空气法以及新的重大恶化污染源审查/预防法". 网址：
<http://www.epa.gov/compliance/data/planning/priorities/caansrpsd.html> 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA). 2012a. Municipal Solid Waste. Available at
<http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/>
美国环保局（US EPA）. 2012a. 城市固体废弃物. 网址：
<http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/>
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA). 2012b. Energy recovery from waste. Available at
<http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/wte/index.htm>
美国环保局（US EPA）. 2012b. 废物能源回收. 网址：
<http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/wte/index.htm>
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA). 2012c. Continuous Emission Monitoring - Information, Guidance, etc. Available at <http://www.epa.gov/ttn/emc/cem.html>
美国环保局（US EPA）. 2012c. 持续排放监测之信息、指南等. 网址：
<http://www.epa.gov/ttn/emc/cem.html>
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA). 2012d. Cement Manufacturing Enforcement Initiative. Available at <http://www.epa.gov/compliance/civil/caa/cement/index.html>
美国环保局（US EPA）. 2012d. 水泥制造业实施计划. 网址：
<http://www.epa.gov/compliance/civil/caa/cement/index.html>
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA). 2012e. About Air Toxics. Available at
<http://www.epa.gov/ttn/atw/allabout.html>
美国环保局（US EPA）. 2012e. 关于空气毒物. 网址：<http://www.epa.gov/ttn/atw/allabout.html>
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA). 2008. Cement Sector Trends in Beneficial Use of Alternative Fuels and Raw Materials-Revised Draft. Available at
<http://www.epa.gov/sectors/pdf/cement-sector-report.pdf>
美国环保局（US EPA）. 2008. 水泥行业使用替代燃料与原料的趋势草案. 网址：
<http://www.epa.gov/sectors/pdf/cement-sector-report.pdf>

- Van Oss, H. 2005. Background Facts and Issues Concerning Cement and Cement Data. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. Available at pubs.usgs.gov/of/2005/1152/2005-1152.pdf
- Van Oss, H. 2005. 水泥与水泥数据的背景资料与事项. 美国内政部. 美国地质调查局. 网址: pubs.usgs.gov/of/2005/1152/2005-1152.pdf
- Vandenbroek International, 2012. Waste Drying & Municipal Waste Treatment. Available at <http://www.vadeb.com/applications/msw-drying-rdf/>
- Vandenbroek International, 2012. 废物干化与城市废弃物处理. 网址: <http://www.vadeb.com/applications/msw-drying-rdf/>
- Verein Deutscher Zementwerke (VDZ). 2010. "Activity Report 2007-2009." Düsseldorf, Germany. Available at: http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/TB07_09/VDZ_ActivityReport07_09.pdf Accessed on April 13, 2012
- 德国水泥企业协会（VDZ）. 2010. "2007-2009 活动报告". 杜塞尔多夫. 德国. 网址: http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/TB07_09/VDZ_ActivityReport07_09.pdf 最后查看日期 2012 年 4 月 13 日
- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). 2012a. Guidelines for Emissions Monitoring and Reporting in the Cement Industry. Version 2.0 (2012); Final Draft 5.9.1: 19 January 2012.
- 世界企业永续发展委员会（WBCSD）. 2012a. 水泥行业排放监测与报告指南. 版本 2.0 (2012) ; 终稿 5.9.1: 2012 年 1 月 19 日.
- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). 2012b. Employee Health and Safety. Available at <http://www.wbcsdcement.org/index.php/key-issues/health-and-safety>
- 世界企业永续发展委员会（WBCSD）. 2012b. 员工健康与安全. 网址: <http://www.wbcsdcement.org/index.php/key-issues/health-and-safety>
- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). 2009. Cement Sustainability Initiative: Cement Industry Energy and CO₂ Performance "Getting the Numbers Right." Available at <http://www.wbcsd.org/DocRoot/IV5ZFD9dESJoSb3h7kxM/csi-gnrreport-withlabel.pdf>.
- 世界企业永续发展委员会（WBCSD）. 2009. 水泥可持续发展计划: 水泥行业能源与 CO₂ 表现 "降低排放量". 网址: <http://www.wbcsd.org/DocRoot/IV5ZFD9dESJoSb3h7kxM/csi-gnrreport-withlabel.pdf>.
- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). 2005. Guidelines for the Selection and Use of Fuels and Raw Materials in the Cement Manufacturing Process. Available at <http://www.wbcsdcement.org/index.php/publications>
- 世界企业永续发展委员会（WBCSD）. 2005. 水泥制造过程燃料与原料的选择与使用指南. 网址: <http://www.wbcsdcement.org/index.php/publications>
- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). 2002. Toward a Sustainable Cement Industry: Environment, Health, and Safety Performance Improvement. Available at http://www.wbcsd.org/web/projects/cement/tf3/sub_ehs.pdf
- 世界企业永续发展委员会（WBCSD）. 2002. 构建一个可持续的水泥行业: 环境、健康与安全表现提升. 网址: http://www.wbcsd.org/web/projects/cement/tf3/sub_ehs.pdf

- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)/International Energy Agency (IEA).
2009a. Cement Technology Roadmap 2009 - Carbon emissions reductions up to 2050. Available at: www.iea.org/papers/2009/Cement_Roadmap.pdf
世界企业永续发展委员会（WBSCD）/国际能源局（IEA）. 2009a. 水泥技术路线图 2009---2050
年前的碳排放缩减计划. 网址: www.iea.org/papers/2009/Cement_Roadmap.pdf
- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)/International Energy Agency (IEA).
2009b. Cement roadmap targets. Available at
www.iea.org/papers/2009/Cement_Roadmap_targets_viewing.pdf
世界企业永续发展委员会（WBSCD）/国际能源局（IEA）. 2009b. 水泥路线图目标. 网址:
www.iea.org/papers/2009/Cement_Roadmap_targets_viewing.pdf
- Worrell, E., C. Galitsky. 2004. Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making. An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers. Available at www.energystar.gov/ia/business/industry/LBNL-54036.pdf
- Worrell, E., C. Galitsky. 2004. 水泥行业的能源效率提升与成本缩减机遇. ENERGY STAR®能源与工厂管理者指南. 网址: www.energystar.gov/ia/business/industry/LBNL-54036.pdf
- WWF. 2008. A blueprint for a climate friendly cement industry. Available at
http://wwf.panda.org/about_our_earth/all_publications/?151621/A-blueprint-for-a-climate-friendly-cement-industry
- 世界自然基金会. 2008. 构建气候友好型水泥行业的蓝图. 网址:
http://wwf.panda.org/about_our_earth/all_publications/?151621/A-blueprint-for-a-climate-friendly-cement-industry
- Zabaniotou, A. and Theofilou, C. 2008. Green energy at cement kiln in Cyprus—Use of sewage sludge as a conventional fuel substitute. Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 (2008): 531–541.
- Zabaniotou, A. 与 Theofilou, C. 2008. 塞浦路斯水泥窑绿色能源——使用污泥作为常规燃料替代品. 可再生与可持续能源回顾 12 (2008) : 531-541
- Zhang, D. Q., S.K. Tanb, R.M. Gersbergc. 2010. "Municipal solid waste management in China: Status, problems and challenges." Journal of Environmental Management. Volume 91, Issue 8, August, pp. 1623–1633.
- Zhang, D. Q., S.K. Tanb, R.M. Gersbergc. 2010. "中国的城市固体废弃物：现状、问题与挑战". 环境管理杂志. 卷 91, 第 8 期, 八月, 第 1623 页-1633 页。

附录

附录一 水泥生产流程与能源使用

采矿与采石

水泥生产过程最常用的原料包括石灰石、白垩与粘土，而石灰石或白垩是水泥的主要成分。这类原料通常来自于水泥厂周边或邻近的采石场。石灰石提供了氧化钙和部分其他氧化物；而粘土、页岩和其他原料提供了水泥生产所需的大部分硅、铝及氧化铁。大约5%的水泥生产过程CO₂排放与矿石开采和运输有关（WWF 2008）。

原料粉磨与制备

水泥原料粉磨是一个需要耗费大量电力的工序，通常每吨原料需要25到35千瓦时的电力。粉磨随着熟料生产工艺类型的不同而改变。使用干法工艺的话，原料被卧式球磨机、立式辊压机或辊式压滤机磨成具有流动性的粉末。随后使用水泥窑或熟料冷却机罩的废热，或来自单机空气加热器的辅助热量，实现物料干化。干料的水分含量通常在0.5%左右，也可能在0%到0.7%不等。在部分地区或国家，倘若原料非常潮湿，那么湿法处理就更受欢迎。使用湿法工艺的话，原料经球磨机或管磨机粉磨，而后添加水，制成水分含量24-48%不等的泥浆，但通常为36%（Worrell与Galitsky 2004）。

熟料烧制

熟料烧制是水泥生产过程中最耗费能源的阶段，占据了超过90%的水泥行业能源使用量以及几乎百分百的燃料使用量。窑炉系统蒸发掉生料固有的水分、烧结碳酸成分（碳素煅烧）²²、以及形成水泥矿物（熟料烧结）。现今使用的高热或高温处理窑的类型主要是干法回转窑。干法回转窑使用水分（0.5%）低的原料。美国人开发首个干法窑工艺，但当时并不包括预热步骤。随后发展添加了多级悬浮预热器（旋风预热器）或立筒预热器。近年来，人们开发出了预分解技术，在窑炉与常规预热器之间增加了一个二燃室，这有助于进一步减少窑炉的燃料需求。配置四级、五级或六级预热器的干法回转窑通常每生产一顿熟料，需要3.5GJ的热量，且几乎水泥生产过程的全部工艺相关CO₂排放系来自于熟料生产阶段的煅烧步骤。一旦熟料在回转窑内形成，将被迅速地冷却以最小化玻璃的形成，同时确保产出最多的硅酸三钙石——一种构成水泥硬化特性的重要成分。主要的冷却技术包括篦冷机、管式冷却器或行星式冷却机。现如今最常用的是篦冷机。使用篦冷机时，熟料被输送到往复炉篦上。通过往复炉篦的气流与熟料呈直角（Worrell与Galitsky 2004）。

终粉磨

为生产粉状水泥，熟料球经球磨机、辊式压滤机以及辊压机的精细粉磨。在这个阶段，通常添加3%-5%的石膏以控制水泥的固化特性。水泥生料与终粉磨所消耗的电量完全取决于材料（石灰石、熟料、火山灰等）的硬度、预期水泥细度以及添加剂数量。高炉渣比较不好粉磨，因此需要消耗更多的能源。传统上，球磨机用于终粉磨，但是一些工厂也使用立式滚压机。现代化的新型方法使用了高压辊压机或卧式辊压机（如Horomill®）。成品水泥贮存与筒仓内；经测

²²煅烧是高温加热一种物质，即低于该物质的熔点，来改变该物质的物理和化学结构的过程。

试；而后装袋付运或由水泥车、轨道车、驳船或轮船散装运输(Worrell 与 Galitsky 2004)。图A.1展示了新型干法水泥窑系统的水泥生产流程²³。

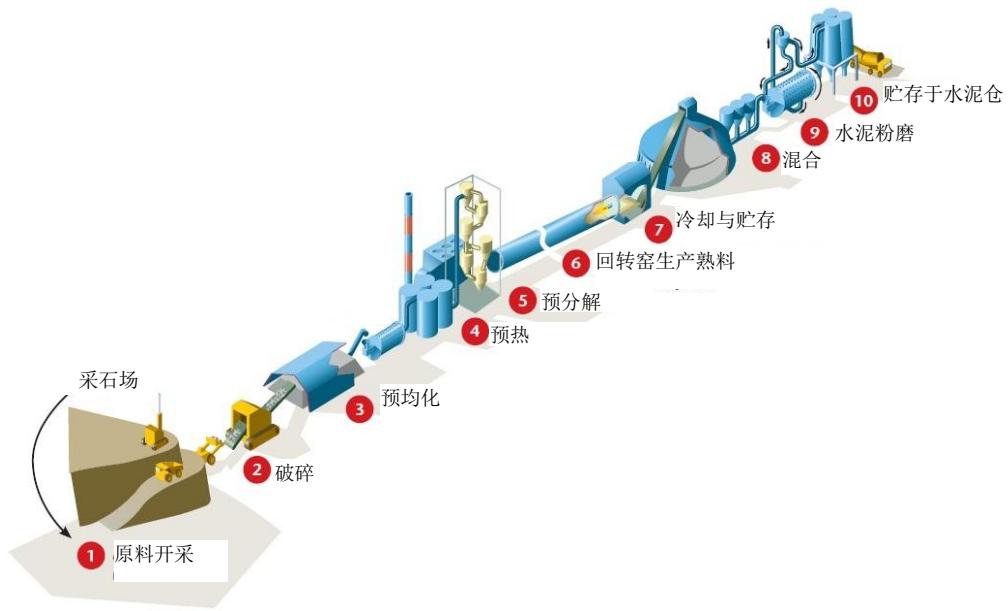
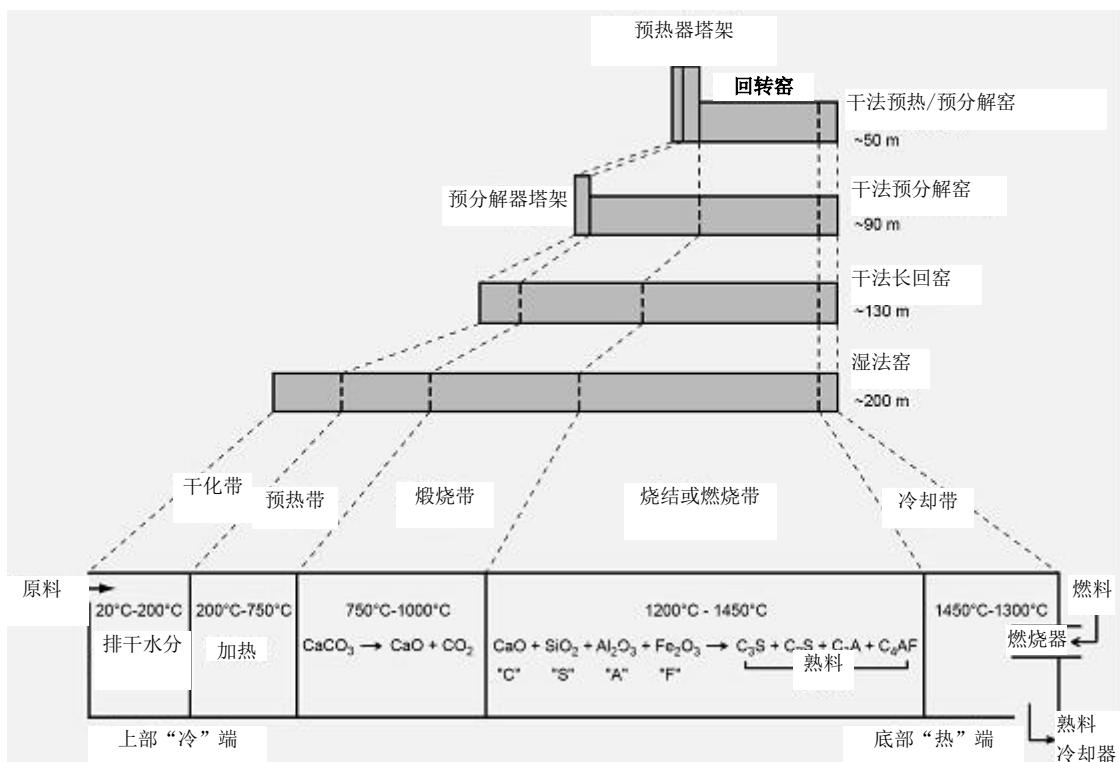


图 A.1. 采用新型悬浮预热与预分解窑的水泥生产流程(WBCSD/IEA 2009a)

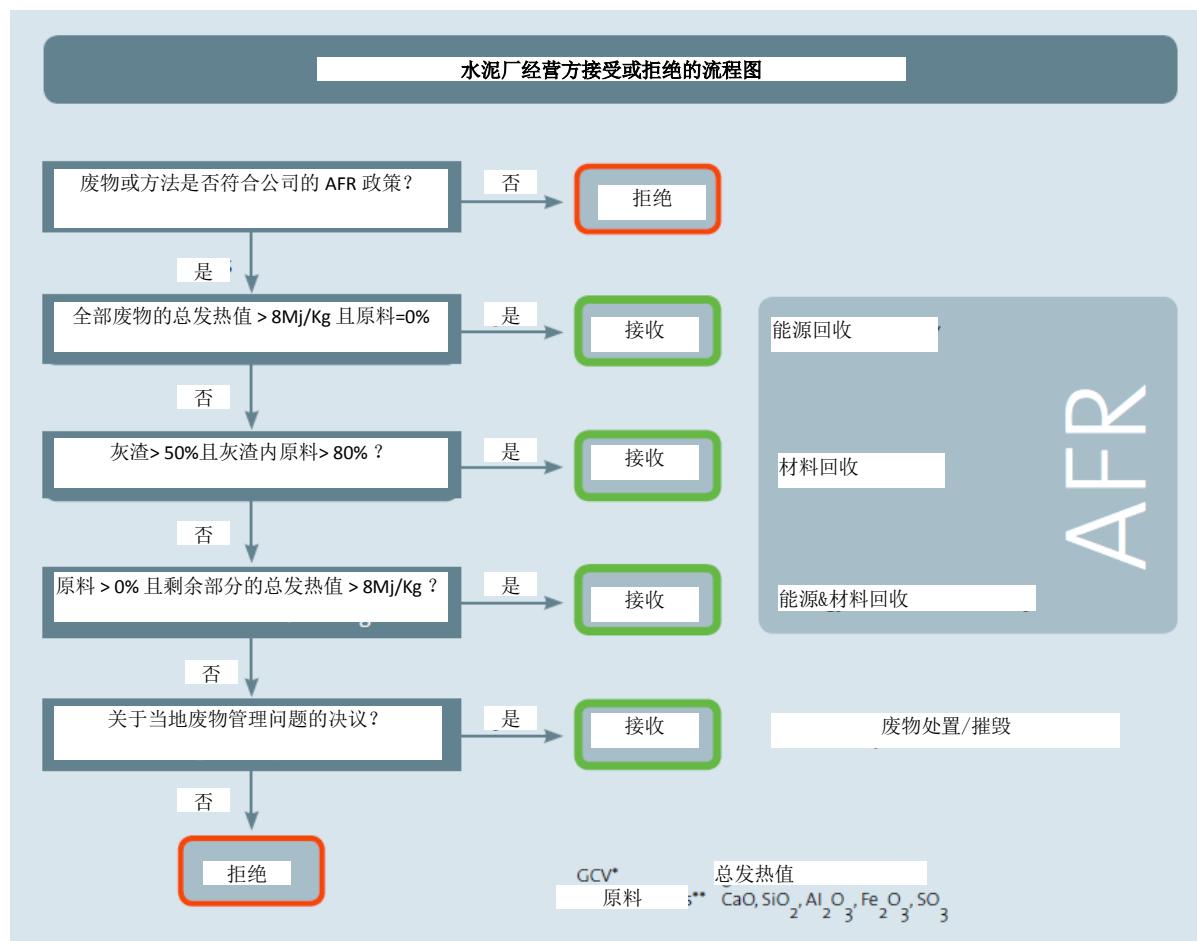
²³这种水泥生产流程的描述部分摘自 Worrell 与 Galitsky (2004)。

附录二 不同窑炉技术的反应带图解



资料来源：Van Oss (2005)

附录三 接受—拒绝示例图



资料来源： GTZ/Holcim (2006)

附录四 RDF 生产线的性能与成本

表 A.4.1 不同废物给料类型的 RDF 生产线性能与成本 (Caputo 与 Pelagagge 2002)

生产线 编号	生产线配置	城市固体废弃物 投入比例(%)	效率 (%)	水分 (%)	灰渣 (%)	低位发热值 (kcal/kg RDF)	生产成本 (Euro/t RDF)
1	PT-HS-MS-S-T-M-T	100	18.3	8.76	6.0	3478	16.56
2	T-HS-MS-S-T-M-T	100	24.9	9.05	6.67	3388	15.07
	T-HS-MS-S-T-MS						
3	M-T	100	24.3	9.0	6.28	3403	15.64
	T-MS-MS-S-T-MS						
4	M-T-MS	100	23.8	9.0	622	3406	16.18
5	T-HS-MS-S-T-ECS-M-T	100	24.1	9.1	5.3	3434	15.93
6	T-HS-ECS-S-T-ECS-M-T	100	24.0	9.1	5.28	3438	16.19
7	T-HS-MS-S-T-S-T-M-T	100	20.9	6.9	6.42	3546	20.15
	T-US-MS-S-T-MS-S-						
8	T-M-T	100	20.5	6.9	6.06	3559	20.78
9	T-HS-MS-S-T-ECS-S-T-M-T	100	20.3	6.9	5.23	3590	21.18
10	S-T-MS-M-T	100	30.7	10.7	8.5	3152	9.48
11	S-T-MS-S-T-M-T	100	24.7	1A	7.7	3409	12.45
12	S-T-MS-S-T-MS-M-T	100	24.1	7.4	7.3	3424	12.97
13	S-T-ECS-S-T-MS M-T	100	23.7	1A	5.5	3488	13.37
14	S-T-ECS-S-T-ECS- M T	100	23.6	7.4	5.3	3494	13.59
2	T-HS-MS-STMT	90	31.9	7.8	6.15	3792	12.26
7	T-HS-MS-S-T-S-T-M T	90	28.2	6.0	5.9	3961	15.50
8	T-HS-MS-S-T-MS-S-T-M-T	90	27.8	5.9	5.7	3977	15.32
9	T-HS-MS-S-T-ECS-S-T-M-T	90	27.6	6.0	5.1	3999	15.60
IS	T-HS-ECS-S-T-ECS-S-T-M-T	90	27.6	6.0	5.1	4001	15.76
10	S-T-MS-M-T	90	37.3	9.65	7.6	3544	9.26
11	S-T~MS-S~T-M-T	90	31.8	6.8	6.9	3804	10.17
2	T-HS-MS-S-T-M-T"	80	38.9	7.1	5.83	4050	11.85
10	S-T-MS-M-T	80	43.5	8.2	6.9	3846	9.68
11	S-T-MS-S-T-M-T	80	38.6	5.8	6.3	4083	10.19
2	T-HS-MS-S-T-M-T'	70	45.8	6.6	5.6	4230	10.47
10	S-T-MS-M-T	70	49.9	7.5	6.4	4060	7.54
2	T-HS-MS-S-T-M-T*	60	53.5	12	5.4	4310	9.12
10	S-T-MS-M-T	60	56.3	6.9	6.1	4225	6.82
2	T-HS-MS-S-T-M-T'	SO	59.4	5.13	5.35	4499	8.47
10	S-T-MS-M-T	50	62.8	6.4	5.8	4355	6.12

^a适合于向并行堆肥厂馈料的生产线

ECS = 涡电流分选机

HS = 手动分选

LHV = 低发热值

M = 粉磨机

MS = 磁选机

PT = 初步滚筒筛

RDF = 废物衍生燃料

S = 碎机

T = 滚筒筛

表 A.4.2 不同废物给料类型的固化 RDF 生产线性能与成本 (Caputo 与 Pelagagge 2002)

生产 线编 号	生产线配置	城市固体废弃 物投入比例(%)	效率 (%)	水分 (%)	低位发热值 (kcal/kg RDF)	生产成本 (Euro/t RDF)	
						固化成型	粒化
2	T-HS-MS-S-T-M-T-DE/P*	80	38.9	7.1	405(1	12.71	13.57
11	S-T-MS-S-T-M T DE/P	80	38.6	5.8	4083	11.05	11.92
2	T-HS-MS-S-T-M-T-DE/P1	70	45.8	6.6	4230	11.20	11.93
10	S-T-MS-M-T-DE/P	70	49.9	7.5	4060	8.21	8.88
2	T-HS-MS-S-T-M-T-DE/P"	60	53.5	7.2	4310	9.75	9.75
10	S-T-MS-M-T-DE/P	60	56.3	6.9	4225	7.42	7.42
2	T-HS-MS-S-T-M-T-DE/P*	50	59.4	5.13	4499	9.04	9.04
10	S-T-MS-M-T-DE/P	50	62.8	6.4	4355	6.65	6.65

^a适合于向并行堆肥厂馈料的生产线

DE =浓缩机

HS =手工分选

LHV =低发热值

M =碾磨机

MS =磁选机

MSW =城市固体废弃物

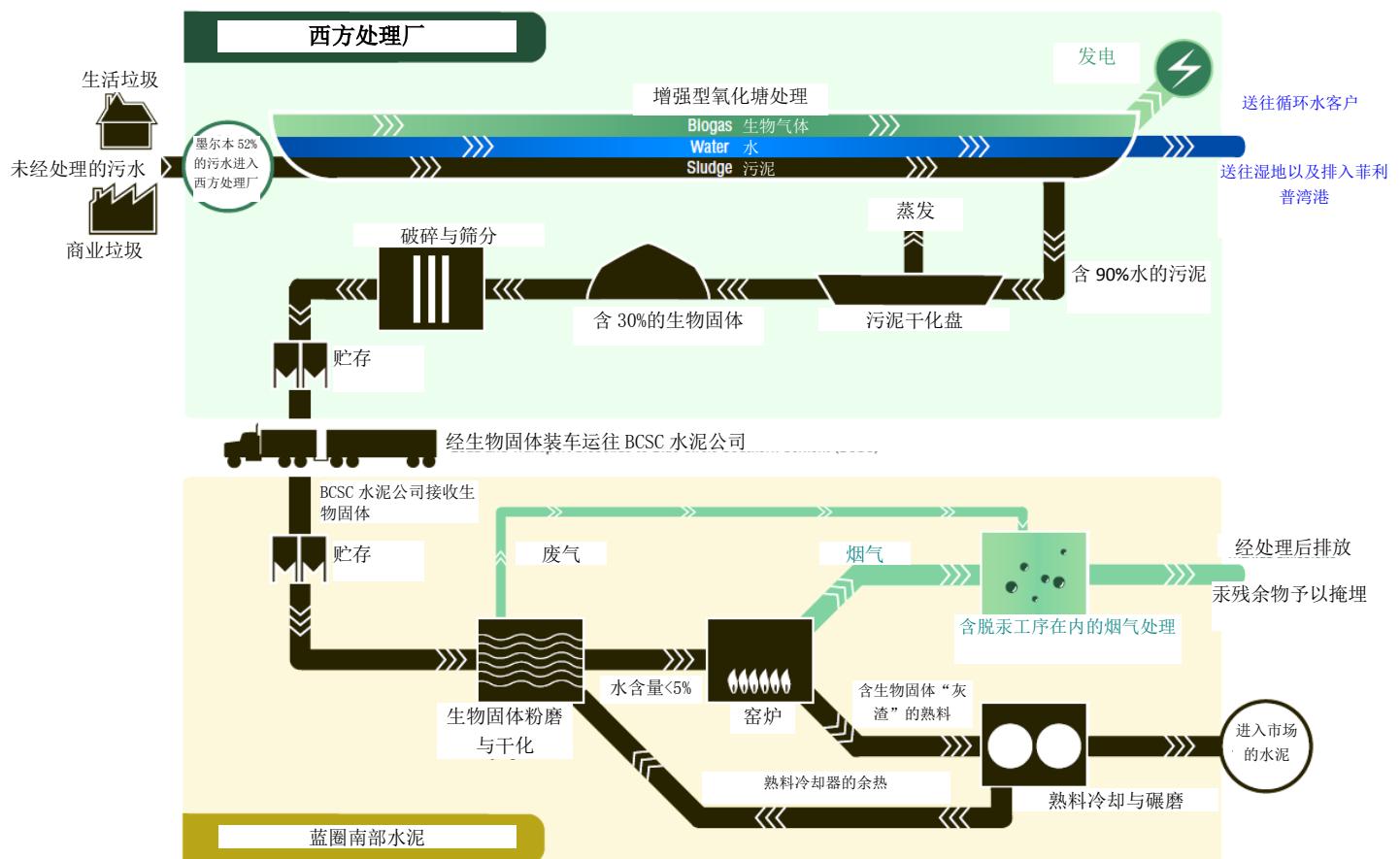
P =造粒机

RDF =废物衍生燃料

S =破碎机

T =滚筒筛

附录五 澳大利亚预处理与协同处置污泥的流程图



资料来源：澳大利亚水泥行业协会（无日期）

附录六 水泥制造过程气体污染物的控制技术

表 A.6.1. 水泥制造过程气体污染物的现行控制技术 (Greer 2003)

现行控制技术	所针对的污染物	潜在影响	
		正面	负面
固有洗涤	SO ₂	视工序而定	视工序而定
O ₂ / 过量空气控制	提高 降低	SO ₂ , THC, CO NOx	NOx, CO ₂ SO ₂ , CO, 产品颜色与品质
替代燃料 (低硫)	SO ₂	视燃料而定	视燃料而定
替代燃料，包含	低硫化物	视物料而定	视物料而定
	低有机物	视物料而定	视物料而定
	低碳酸岩	视物料而定	视物料而定
	低硫化物或氯化物	视物料而定	视物料而定
原料碱/硫平衡	SO ₂	视物料而定	视物料而定
生产线原料碾磨机	SO ₂	THC, AG, NH ₃ , D/F, 烟气	THC, 烟气
预热器加入更高级的熟石灰	SO ₂	D/F	PM
煅烧馈料循环	SO ₂		NOx, CO ₂
水泥窑内部粉尘洗涤器	SO ₂	AG, D/F	
预热器加入更高级的天然碱	SO ₂	AG, D/F	CKD处置
钙基内部洗涤器	SO ₂	D/F, 烟气, 废物处置	
高温处理系统设计	SO ₂	视工序而定	视工序而定
尾喷管湿法气体洗涤器	SO ₂	NH ₃ 、HCl	AG, PM, 固体废弃物处置、废水
减少SO ₂ 生成	AG	SO ₂	
间接受火	NOx	CO ₂	PM
低氮氧化物燃烧器	NOx	视燃烧器/用途而定	视燃烧器/用途而定
窑中烧熔	NOx	视燃用途而定	视燃用途而定
流程提升	NOx	视项目而定	视项目而定
过程控制提升	NOx	视项目而定	视项目而定
低氮氧化物煅烧炉	NOx		CO
分级燃烧	NOx		CO
半直接受火	NOx	PM	
空气混合风扇	NOx, THC, CO	SO ₂	
水泥窑粉尘内喷	NOx		CO, CO ₂ , SO ₂
注入生物固体	NOx		CO, NH ₃ , 烟气, 金属
固有的流程特点 (时间、温度与湍流)	THC	CO	
高温处理系统设计	THC, CO	视工序而定	视工序而定
蓄热式焚化炉	THC, CO	烟气, D/F	NOx, CO ₂ , SO ₃ , AG, 废物处置
良好的燃烧实践	CO	NOx, CO ₂ , SO ₂ , THC	
提升热效率	CO ₂	视项目而定	视项目而定
熟料替代物	CO ₂	减少每生产一顿水泥而排放的气体污染物	减少每生产一顿水泥而排放的气体污染物
提高电机效率	CO ₂	减少每生产一顿水泥而排放的气体污染物	减少每生产一顿水泥而排放的气体污染物
矿化剂	CO ₂	NOx	AG
废热发电	CO ₂	减少与发电相关的全部污染物	减少与发电相关的全部污染物

现行控制技术	所针对的污染物	潜在影响	
		正面	负面
PMCD入口端温度控制	D/F		
缩短停留时间	D/F		

表 A.6.2. 硅酸盐水泥生产过程气体污染物的潜在控制技术 (Greer 2003)

现行控制技术	所针对的污染物	潜在影响	
		正面	负面
空气混合风扇	SO ₂ , NOx, CO, THC		
生产线碾磨机加入熟石灰	SO ₂	THC, AG, D/F, 烟气	
袋式过滤器吸附	SO ₂	AG	
钠基内部洗涤器	SO ₂	AG, D/F, 烟气	CKD处置
钙/钠基内部洗涤器	SO ₂	AG, D/F	CKD处置
富痒	SO ₂ , THC, CO		NOx
	NOx	SO ₂ , CO	
双碱流程 (苏打灰/石灰)	SO ₂	AG	废物处置
热分解 (烘焙)	SO ₂	THC	CO, NOx, CO ₂
尾喷管干法粉尘洗涤器	SO ₂ , AG	AG, THC, D/F	NOx, CO, CO ₂ , 废物处置
水泥窑灰尾喷管洗涤器	SO ₂	THC, NH ₃ , AG, 烟气	
燃料替代物	低氮	NOx	视燃料/工序而定
	高碳氢化合物	CO ₂	视燃料而定
替代性原料，含	低氮	NOx	视物料而定
	低氨	NH ₃	视物料而定
	低二恶英/呋喃	D/F	视物料而定
选择性非催化还原技术	NOx		NH ₃ , 烟气
经修改的直接受火	NOx	PM	
LoTOX™洗涤器	NOx		水排放, 臭氧逃逸
废弃循环	NOx		CO, SO ₂
选择性催化还原技术	NOx		NH ₃ , CO ₂ , 烟气, 固体催化剂废料
Tri-NOX® Multi-Chem 湿法洗涤器	NOx	SO ₂ , AG	水排放
注水/汽	NOx		CO, CO ₂
催化过滤	NOx		
	D/F	PM	
非平衡等离子	NOx	SO ₂ , THC, D/F	
热分解 (烘焙)	THC		SO ₂ , CO
热氧化	THC, CO	D/F	CO ₂ , NOx
蓄热式直燃焚烧法	THC, CO	D/F	CO ₂ , NOx
湿法静电除尘器	THC, AG	SO ₂ , NOx, PM, NH ₃ , D/F, 烟气	废物处置, 废水处理
紫外光	THC, D/F		CO
催化氧化	THC, CO		CO ₂ , NOx
粒状活性炭吸附	THC, D/F	NOx, SO ₂ , 金属	废物处置, 高试剂消耗
粉状活性炭吸附	THC, D/F	NOx, SO ₂ , 金属	二恶英/呋喃, 废物处置, 高试剂消耗
风能太阳能发电	CO ₂	减少与发电相关的全部污染物	减少与发电相关的全部污染物
尾喷管湿法洗涤器	NH ₃ , AG	SO ₂ , THC	PM, 酸雾, 废水
袋式除尘器过滤	AG	SO ₂	
尾喷管干法重碳酸盐注入	AG	SO ₂ , D/F, 烟气	废物处置
温度控制	AG	SO ₂ , NH ₃ , THC, D/F, 烟气	废水/废物处置

附录七 使用 CEMS 测定水泥厂各类污染法的方法推荐

污染物	推荐测定方法
粉尘浓度 <20 mg/Nm ³	光散射法
粉尘浓度 >20 mg/Nm ³	光投射法
一氧化氮 (NO)	非分光红外 (冷与热) /傅氏转换红外线光谱分析仪/紫外差分吸收光谱气体分析仪
氮氧化物 (NO ₂)	傅氏转换红外线光谱分析仪/非分光红外(冷) 与转换器/计算*
二氧化硫	非分光红外 (冷与热) /傅氏转换红外线光谱分析仪/紫外差分吸收光谱气体分析仪
挥发性有机化合物	火焰电离检测器 (FID)

* 或者，可以使用基于抽查测量结果或计算结果的缺省值

NDIR: 非分光红外; FTIR: 傅氏转换红外线光谱分析仪; UV: 紫外线

参数	推荐测定方法
氧	氧化锆(ZRO ₂ 方法) /顺磁方法
水分	非分光红外 (热) /傅氏转换红外线光谱分析仪/ 激光法/固定值*
容积流量	超声波法/ 微差压原理
温度	Pt100-传感器 / 现场分析仪
绝对压力	综合现场分析仪 / 固定值*
气体压力	独立传感器 / 体积压力 /累计固定值流 (微差压力) / 固定值*

*或者，可以使用基于抽查测量结果或计算结果的缺省值

资料来源: WBCSD (2012a)

附录八 水泥厂排放测量标准：取样与分析

污染物	E 标准/参考方法	抽査/持续监测	取样/分析
粉尘	EN 13284-1:2002	Spot	取样和分析
	US EPA method 5, 5i, 17	Spot	
	ISO 9096:2003	Spot	
	ISO 12141:2002	Spot	
氮氧化物 (NO _x /NO ₂)	EN 14792:2006	Continuous	取样和分析
	US EPA method 7 E	Continuous	
	US EPA method 7 (A to D)	Spot	
	ISO 10849:1996	Continuous	
	ISO 11564:1998	Spot	
硫氧化物 (SO _x /SO ₂)	EN 14791:2006	Spot	取样和分析
	US EPA method 6 C	Continuous	
	US EPA 6, 6A, 8	Spot	
	ISO 7935:1992	Continuous	
	ISO 7934:1998	Spot	
汞	EN 13211:2001-2005	Spot	取样
	EN 14884:2005	Continuous	取样和分析
	US EPA method 29, 101A	Spot	
重金属	EN 14385:2004	Spot	取样和分析
	US EPA method 29	Spot	
挥发性有机化合物 /总碳氢化合物	EN 13649:2002	Spot	取样和分析
	EN 12619:2000	Continuous	
	US EPA method 25A	Continuous	
PCDD/F	EN 1948-1/2/3/4:2006	Spot	取样和分析
	US EPA method 23	Spot	

PARAMETER 参数	STANDARD / REFERENCE 标准/参考方法	SPOT/CONTINUOUS 抽査/持续监测	SAMPLING/ ANALYSIS 取样/分析
GAS VELOCITY, MOISTURE AND OXYGEN 气体流速、水分与氧气			
Flow Rate & 流速&速率	US EPA 1, 2	Continuous	measurement 测量
	ISO 10780:1994	Continuous	
Moisture 水分 (水蒸汽)	EN 14790:2005	Spot	Sampling and analysis 取样和分析
	US EPA 4	Spot	
Oxygen 氧气	EN 14789:2006	Spot	Sampling 取样
	US EPA 3, 3B	Spot	
	US EPA 3A	Continuous	Sampling and analysis 取样和分析

资料来源：WBCSD (2012a)

附录九 水泥行业替代燃料预处理与协同处置技术供应商名单

以下是水泥行业替代燃料预处理与协同处置技术部分供应商的名单。该名单并不详尽。

城市固体废弃物与污泥的协同处置

- Anlagenbau GmbH (<http://www.wendewolf.com/clsbesch.php?lang=en>)
- Buss-SMS-Canzler (<http://www.sms-vt.com/index.php?id=631&L=1>)
- Continental Biomass Industries (<http://www.cbi-inc.com/applications/msw.aspx>)
- DoppstadtUS (<http://www.doppstadtus.com/>)
- Eurohansa, Inc. (<http://www.eurohansa.com/applications.html>)
- Flottweg Separation Technology (<http://www.flottweg.de/>)
- Franklin Miller, Inc. (<http://www.franklinmiller.com/>)
- Granutech-Saturn Systems (<http://www.granutech.com/solid-waste-shredder.html>)
- Huber Technology (<http://www.huber.de/>)
- Integrated Engineers Inc. (<http://wecleanwater.com/>)
- Klein Technical Solutions GmbH (<http://www.klein-ts.com/en/>)
- Peninsula Equipment (<http://www.peninsulaequipment.com/Products.php>)
- SludgeSolution (<http://sludgesolutions.veoliaes.com/>)
- SSI Shredding Systems (www.ssiworld.com)
- UNTHA shredding technology (<http://www.untha.com/en>)
- Vandenbroek International (<http://www.vadeb.com/applications/msw-drying-rdf/>)

贮存、处理与喂料系统

- Aumund Group (<http://www.aumund.com/>)
- Claudius Peters Technologies GmbH (<http://www.claudiuspeters.com/>)
- EUREMI S.A. (www.euremi.com)
- FCB. Cement S.A. (<http://www.fcb-ciment.com>)
- FLSmidth A/S (<http://www.flsmidth.com/>)
- Fox Valve Development Corp. (<http://www.foxvalve.com>)
- Geo. Robson & Co (Conveyors) Ltd. (<http://www.robson.co.uk/>)
- Metso Minerals Industries Inc. (www.metsominerals.com)
- Pebco Inc. (<http://www.pebco.com/>)
- Pfister GmbH (<http://www.pfister.de/>)
- PILLARD FEUERUNGEN GmbH (<http://www.pillard.de/>)
- Polysius AG (<http://www.polysius.com>)
- Schenck Process Group (<http://www.schenckprocess.com/en/>)
- STAG AG (<http://www.stag.net/>)
- Vecoplan LLC (<http://www.vecoplanllc.com>)
- WTW Engineering (<http://www.mhc-engineering.de/116/>)

石灰窑内城市固体废弃物与污泥混烧

- Cadence Environmental Energy Inc. (<http://www.cadencerecycling.com>)
- FCT-Combustion (<http://www.fctinternational.com>)

- FLSmidth (<http://www.flsmidth.com/>)
- Greco-Enfil International S.L. (<http://www.grecoenfil.com/>)
- KHD Humboldt Wedag GmbH (<http://www.humboldt-wedag.de/>)
- PILLARD FEUERUNGEN GmbH (<http://www.pillard.de/>)
- Polysius AG (<http://www.polysius.com/>)
- Unitherm Cemcon Firingsystems GesmbH (<http://www.unitherm.co.at/>)

排放控制系统

- Ecotech (<http://www.ecotech.com/>)
- Sick Group (<http://www.sick.com/>)
- K2BW (<http://www.k2bw.com/>)
- Altech Environment U.S.A. (<http://www.altechusa.com/>)